



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo de fin de grado

Análisis vibratorio de un dispositivo mecánico.

Aplicación a un sistema ferroviario

Autor: David Erasmo Quispe Abregú

Tutores: Higinio Rubio Alonso

Alejandro Bustos Caballero

Leganés, Febrero del 2017

**Título: Análisis vibratorio de un dispositivo mecánico.
Aplicación a un sistema ferroviario**

Autor: David Erasmo Quispe Abregú

Tutores: Higinio Rubio Alonso
Alejandro Bustos Caballero

EL TRIBUNAL

Presidente: Jesús Morcillo Bellido

Vocal: Pablo González Rodríguez

Secretario: Javier Manuel Muñoz García

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día 13 de marzo de 2017 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

*A Francisca Córdova,
que me observa
siempre desde el cielo.*

Agradecimientos

Primero ante todo dar las gracias al profesor Higinio Rubio Alonso y Alejandro Bustos Caballero, por permitirme realizar el proyecto de análisis vibratorio y así mismo la paciencia y apoyo que me tuvieron a lo largo del proyecto.

También deseo agradecer a mis padres por brindarme su apoyo a lo largo del trabajo de fin de grado y mi hermano por ser un gran sustento en momentos difíciles.

RESUMEN

En este proyecto se lleva a cabo un análisis de vibraciones de un dispositivo mecánico (sistema ferroviario), a partir de la toma de señales proporcionadas por tres acelerómetros. Estos acelerómetros estarán posicionados en la caja de grasa del bogie de un vagón de pasajeros de un Ave de la empresa Renfe, cada uno ubicado en los ejes longitudinal, axial y vertical. Las señales obtenidas fueron de la ruta Sevilla - Madrid en horario de las 8:00 am hasta 19:00 pm, de lo cual conseguimos 3 periodos de viaje para nuestro estudio.

El análisis posterior de las señales vibratorias se realizará empleando la herramienta de software matemático MATLAB, la cual nos permitirá crear un programa completamente automatizado. Dicho programa empezará clasificando las señales mediante filtros en un rango de velocidades, ubicando el recorrido y eliminando aquellas señales defectuosas; así obteniendo su representación en el dominio del tiempo y a continuación otro grafico en el dominio de la frecuencia.

Una vez terminado la representación de las señales, se prosigue con un estudio estadístico en el dominio temporal, de los cuales realizaremos una representación de su varianza, medias cuadráticas y curtosis; y respecto al dominio de la frecuencia se realizará unos diagramas de las frecuencias más repetidas para observar similitudes y variaciones en cada eje de cada recorrido realizado.

ABSTRACT

In this project, will carry out a vibration analysis of a mechanical device (rail system), from the taking of signals provided by three accelerometers. These accelerometers will be positioned in the bogie's axle box of passengers' wagon of an AVE of the company Renfe, each of these located in the longitudinal, axial and vertical axis. The signals were obtained from the Seville-Madrid route since 8:00 am to 19:00 pm, which we obtain three travel's periods for our examination.

The study of vibration's signals will be carried out by the mathematical software MATLAB, which enable us to create an automated program. This program will start classified the signals through filters of speed range, situated the travels and delete deficient signals; also, obtained graphics in the time and frequency domains.

Once drafted the graphics of signals, will be continued with a statistical study in the time domain, used an analysis of variance, root mean square and kurtosis. In the frequency domain, will be carried out diagrams of the most repeated frequencies, which we may see similarities and differences in each axis of each travel.

Índice

1. Introducción.....	pág. 1
Motivación.....	pág. 2
Objetivos	pág. 4
Etapas del proceso.....	pág. 5
Estructura del documento.....	pág. 6
2. Complementos teóricos.....	pág. 7
El bogie y sus características	pág. 8
Vibración mecánica.....	pág.16
Clasificación de las vibraciones.....	pág.17
Análisis de señales vibratorias	pág.19
3. Herramientas empleadas.....	pág.28
MATLAB ventana principal y comandos.....	pág.29
4. Organización, Metodología y Desarrollo del proyecto.....	pág.33
Organización.....	pág.34
Metodología.....	pág.34
Desarrollo del proyecto.....	pág.37
5. Resultados.....	pág.51
Análisis temporal varianza.....	pág.52
Análisis temporal varianza.....	pág.56
Análisis temporal varianza.....	pág.60
Análisis de frecuencia.....	pág.65
6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	pág.70
7. Presupuesto.....	pág.73
8. Bibliografía.....	pág.76
9. Anexo.....	pág.78

INTRODUCCIÓN

Motivación

En la sociedad de estos días, el avance de la tecnología es parte indispensable en la vida del ser humano, ya que con ella creamos bienes y servicios que satisfacen las necesidades del hombre.

Entre estos avances, los medios de transporte son un sector que se ha desarrollado enormemente a lo largo de la historia, ya que desde sus principios el hombre es un ser que anda y se desplaza y en su afán de ir a lugares más lejanos en menor tiempo se ha volcado en su desarrollo.

Entre los medios de transporte utilizados, el terrestre es el que sin duda más se ha desarrollado; y entre ellos el ferrocarril (*ilustración 1*), desde su invención en el siglo XVIII, ha demostrado una gran evolución.



Ilustración 1- Ferrocarril de alta velocidad

El ferrocarril es un transporte que debido a su enorme tamaño nos permite trasladar una cantidad grande de viajeros, así como trasladar objetos de gran tamaño y cantidad. Así mismo, su tamaño proporciona una complejidad en su estructura, ya que en cada vagón se halla el bogie, en la cual residen diferentes elementos mecánicos que permiten el desplazamiento del tren.

Al ser un elemento en donde moran diferentes piezas, es importante saber si tiene fallas ya que esto podría ocasionar un grave accidente que afectaría a cientos de pasajeros, causando lesiones graves e incluso la muerte.

También hay tener en cuenta que un accidente no solo acarrea pérdidas humanas sino económicas; y es a través de estos accidentes que el hombre toma más atención en el estudio de estos problemas y sus posibles soluciones.

Por todo esto, es necesario pensar en métodos de detección de defectos, que nos permitan hacer los mantenimientos preventivos correctos y así evitar grandes catástrofes. Por lo tanto, en vista de todo esto realizamos este estudio de análisis de vibraciones para verificar (sin el uso de cambios frecuentes de las piezas) fallas o deficiencias e instaurar un protocolo preventivo de vigilancia para el cambio del bogie.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar una metodología para generar un documento ("pdf" y "word"), en cual se muestre las representaciones y patrones del análisis de señales vibratorias generadas por la caja de grasa de un vehículo ferroviario de alta velocidad.

Para ello haremos uso, como herramienta, del software matemático MATLAB, el cual nos permitirá acceder a la información de las señales almacenadas en la tarjeta de datos; y por consiguiente su análisis mediante códigos de programación matemáticos propios.

En primer lugar, hallaremos los oscilogramas y espectrogramas de las señales a estudiar, para así obtener los datos básicos de nuestro análisis. Estos análisis se llevarán a cabo mediante:

- Análisis del dominio temporal, del cual obtendremos patrones de los distintos métodos estadísticos (varianza, media cuadrática y curtosis) en sus respectivos ejes y recorridos.
- Análisis del dominio frecuencial, del cual obtendremos patrones de las frecuencias más repetidas de cada eje y en su respectivo recorrido.

También añadimos que, como meta paralela al estudio de señales vibratorias, es el hacer una programación en el software MATLAB totalmente **automatizada**, para que no solo se realice con los datos utilizados en este proyecto sino con distintas señales obtenidas de otros tramos.

Etapas del proceso

Las etapas efectuadas para el estudio de las señales vibratorias son:

- **Etapas 1**

Recopilación de información sobre el tema de las señales vibratorias (concepto, tipos y fallos) y análisis de estas mismas como técnica de mantenimiento predictivo que nos permitirá hallar fallos, evitar accidentes y ahorro económico.

- **Etapas 2**

Obtención de las señales vibratorias en el dominio del tiempo mediante el uso de tres acelerómetros ubicados en los ejes longitudinal, axial, y vertical del bogie del lado derecho.

Cada uno de ellos tomaran datos a lo largo de la ruta Sevilla-Madrid entre 8:00 am y 19:00 pm, de los que obtendremos 3 recorridos en la ruta con los que trabajaremos.

Esta etapa tendrá como duración entre 2 a 3 días debido a la instalación de los objetos de medida y los viajes realizados por el ferrocarril a lo largo de un día entero.

- **Etapas 3**

En esta etapa se realizará un estudio previo del software matemático MATLAB, para poder utilizar los comandos de la interfaz correctamente y ejecutar la carga de los archivos al programa.

Una vez terminado el conocimiento básico del software, iniciaremos la creación de los algoritmos programables teniendo en cuenta los datos administrados por los acelerómetros (nombre, fecha, velocidad, etc).

Al concluir el nuevo programa diseñado, se obtendrán los gráficos de las señales en el dominio del tiempo, su espectro de frecuencias y los patrones de vibración de cada eje en un informe ('pdf' o 'word').

- **Etapas 4**

Por último, se efectuará un análisis visual de los resultados para ver las características y comportamientos de las señales en cada eje durante los 3 recorridos.

Estructura del documento:

La memoria realizada del proyecto estar dividida en:

Sección 1: Introducción

En este apartado daremos una pequeña presentación de lo que deseamos en el proyecto, así como los objetivos que anhelamos cumplir.

Sección 2: Complemento teórico

Aquí explicaremos sobre todo el contenido teórico que se ha necesitado para efectuar el análisis de los datos; desde el concepto de una vibración hasta las transformadas de Fourier que permite obtener el espectro de frecuencias de las señales.

Sección 3: Herramientas empleadas

Daremos una presentación del software matemático MATLAB, comenzando desde la ventana de inicio hasta el uso de comandos básicos para el trabajo de la programación (bucles, condicionales, grafico, etc).

Sección 4: Sistema del procesado

Explicaremos como queremos que se desarrolle el programa, es decir, la metodología que se ha desarrollado para que el software trabaje detallando paso a paso los algoritmos del programa.

Sección 5: Resultados del proyecto

Aquí se dará un análisis visual de los espectros de frecuencia y de los patrones obtenidos de los ejes en sus recorridos y se efectuará su comparativa.

Sección 6: Conclusiones y expectativas

Por último, obtendremos la resolución del proyecto, así como los cambios que se pueden realizar para dar una ampliación del trabajo.

Sección 7: Bibliografía y Anexos

Se adjuntan las referencias de los cuales obtuvimos la información de soporte, al igual que las gráficas obtenidas del estudio vibratorio del proyecto.

COMPLEMENTOS TEÓRICOS

Bogie

1. Concepto

Es un dispositivo giratorio, que posee dos (*ilustración 2*) o tres conjuntos de pares de ruedas articuladas, las cuales se encargan de la circulación sobre los carriles, así como de la adecuación ante curvas y cambios de vía.



Ilustración 2-Bogie de ferrocarril de 2 pares de ruedas

2. Funciones

- Soporta la carrocería del vehículo ferroviario.
- Otorga estabilidad en el recorrido.
- Absorción de vibraciones (confort durante la marcha).
- Disminuye las fuerzas centrífugas en curvas de alta velocidad.

3. Clasificación

Los bogies se pueden clasificar en 2 tipos:

- **Bogie de remolque o remolcado:** no posee en su estructura el motor ni la reductora. Su diseño es simple en comparación al del bogie de motor.
- **Bogie de motor o tracción:** posee en su estructura el motor y reductora. Transmiten los esfuerzos de frenado y empuje mediante las barras de tracción. Además, los motores pueden ser de corriente alterna y corriente continua.

4. Componentes

Entre los componentes que conforman un bogie tenemos los siguientes:

1. Bastidor (*ilustración 3*)

Es el esqueleto del bogie, tiene forma de "H" ya que se constituye de dos largueros y una traviesa. Su objetivo principal es la de soporte para el resto de los componentes.

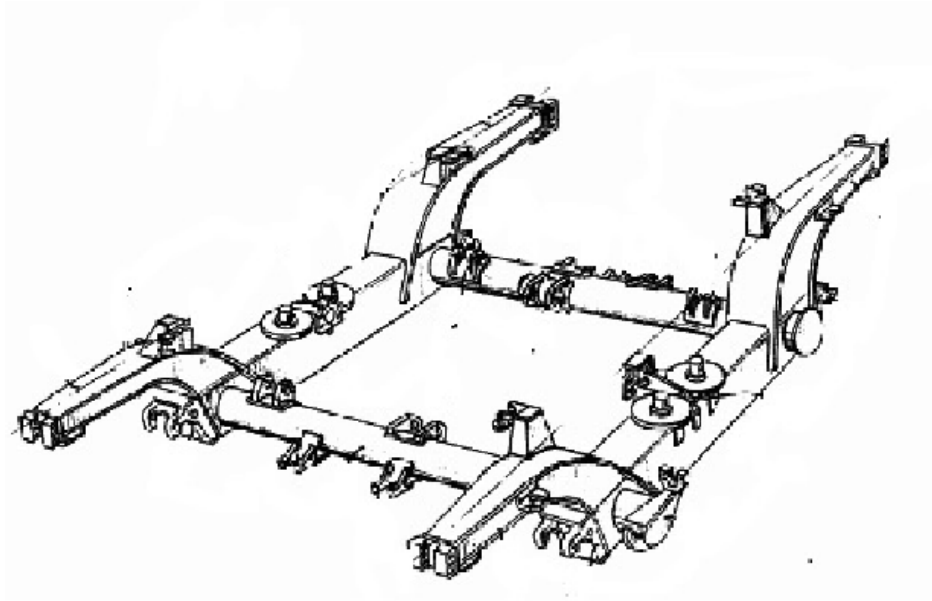


Ilustración 3-Bastidor

2. Reductora(*ilustración 4*)

Mecanismo formado por un conjunto de engranajes que posibilita la modificación del par motor.

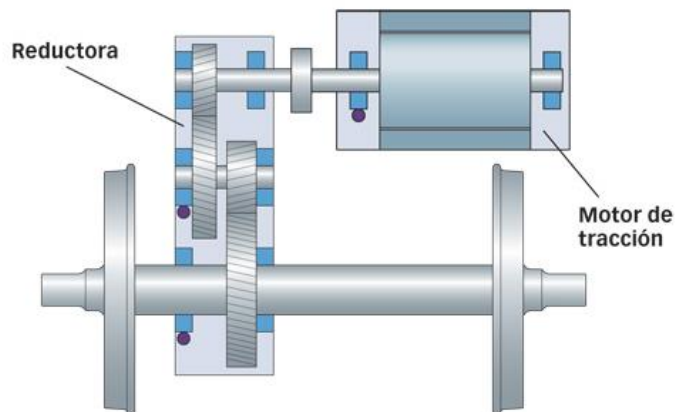


Ilustración 4-Reductora

3. Ejes(*ilustración 5*)

Barra cilíndrica que atraviesa las ruedas y cumple la función de centro de giro de estas mismas. Ella está compuesta en tres partes:

- Fuste: parte central del eje y comprendido entre las ruedas del ferrocarril.
- Calaje: parte donde se calzan las ruedas.
- Manguetas aquí se apoyan los cojinetes de las cajas de grasa, y también el peso suspendido del vehículo

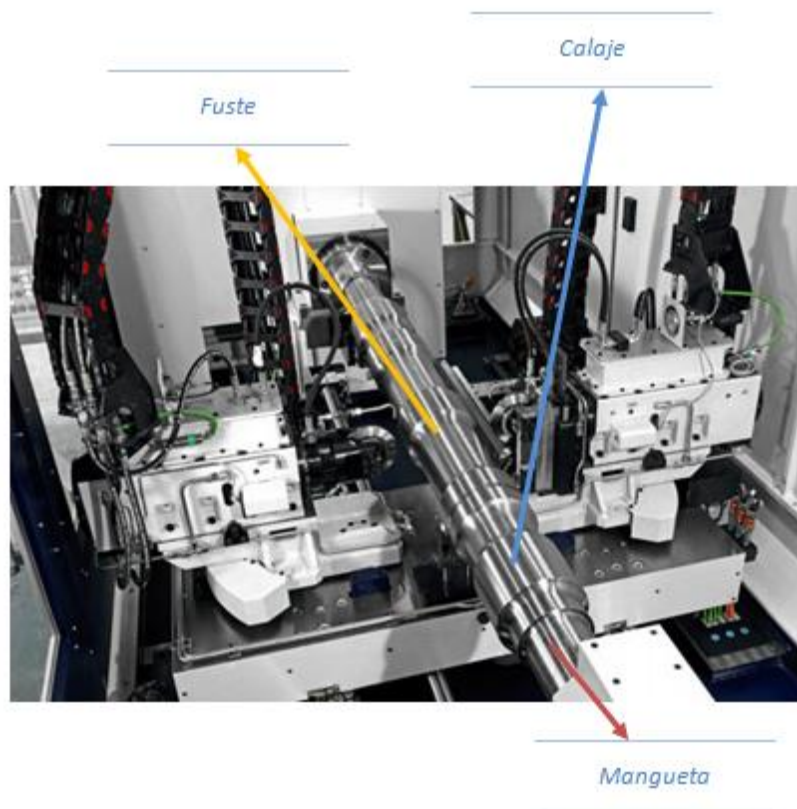


Ilustración 5-Eje de un ferrocarril

4. Rueda(*ilustración 6*)

Es el componente que interactúa directamente con las vías ferroviarias y en el cual se da el movimiento de giro para el desplazamiento del ferrocarril.

Las partes principales de la rueda podemos distinguir:

- Centro de rueda: se dice que dura eternamente.
- Llanta de rueda: parte en contacto con las vías. Está sometida a desgastes y choques, por lo tanto, es necesaria reemplazarla o rectificarla.



Ilustración 6-Rueda de ferrocarril

5. Caja de grasa(*ilustración 7*)

Es aquel componente del bogie que conecta el eje del bogie con las suspensiones del vehículo ferroviario, lo cual permite el traspaso de fuerzas y giro del eje.

Este elemento está compuesto por rodamientos sensorizados, de los cuales obtenemos la velocidad de giro del eje y temperatura; con lo cual nos permite un correcto mantenimiento sobre ellos.



Ilustración 7-Caja de grasa

6. Elementos de suspensión

Denominamos suspensión a los dispositivos que se encargan de proteger los componentes del ferrocarril, permitan equilibrio y otorguen confort a los pasajeros, en cualquier condición de las vías (*ilustración 8*).

Entre los distintos sistemas de suspensión en ferrocarriles tenemos:

- **Sistema de suspensión primaria:** dispositivos mecánicos e hidráulicos que amortiguan los esfuerzos entre rueda y bogie. Reparte de manera equitativa los esfuerzos sobre las ruedas para evitar los descarrilamientos.

- **Sistema de suspensión secundario:** dispositivos mecánicos, neumáticos e hidráulicos que amortiguan los movimientos entre la carrocería y bogie. Evita la propagación de las vibraciones de manera lateral y vertical.

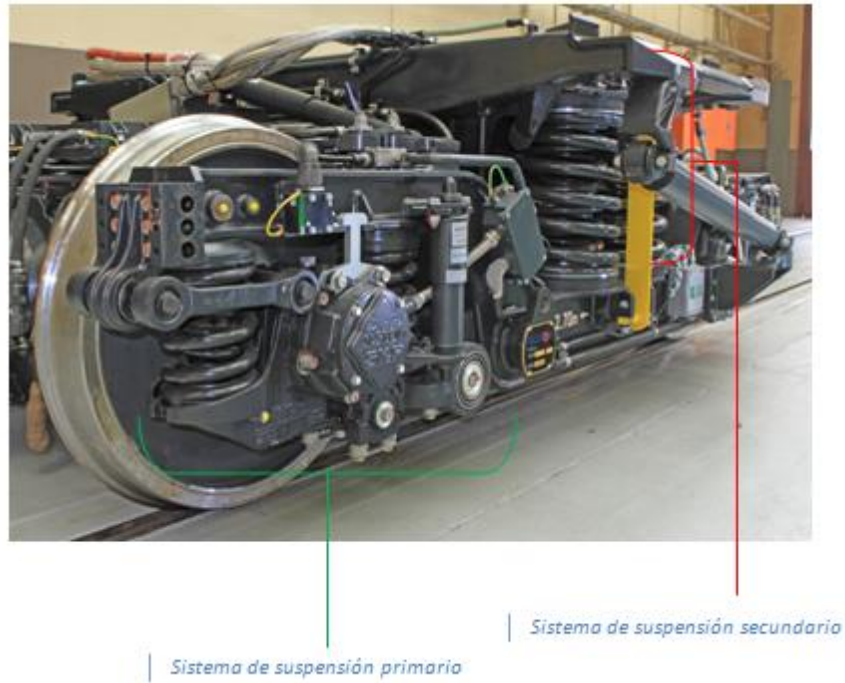


Ilustración 8-Tipos de sistemas de suspensión

Los dispositivos de suspensión que se utilizan son:

- **Ballestas:** superposición de laminas de acero de aéreas parabólicas o trapezoidales, son un dispositivo antiguo, pero aun en uso, ya que es económico y amortiguación lateral y vertical(*ilustración 9*).



Ilustración 9-Ballesta

- **Neumático:** balones de caucho natural, ancladas a un soporte dependiendo el tipo de vehículo que utilizemos(*ilustración 10*). Principalmente es usada en vehículos de transporte de pasajeros, ya que mantiene su altura de suspensión mediante la inyección y extracción de aire. Su mantenimiento es muy económico y es menos pesada que las ballestas. Está compuesta por balona, cavidad de aire, muelle auxiliar y soporte (*ilustración 11*).

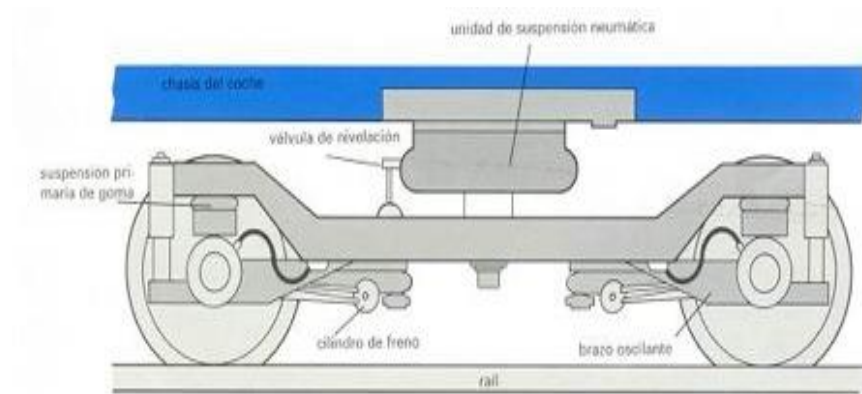


Ilustración 10-Ubicación de dispositivo neumático

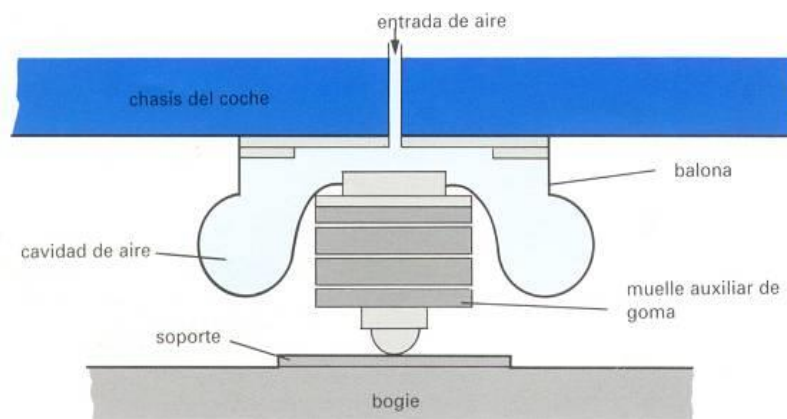


Ilustración 11-Partes del dispositivo neumático

- **Resortes helicoidales:** elementos fabricados de acero, que debido a su capacidad elástica absorbe irregularidades a lo largo de la marcha del vehículo. Su utilidad se debe a que son muy compactos y de regulación precisa; van acompañados de un disipador externo(*ilustración 12*).

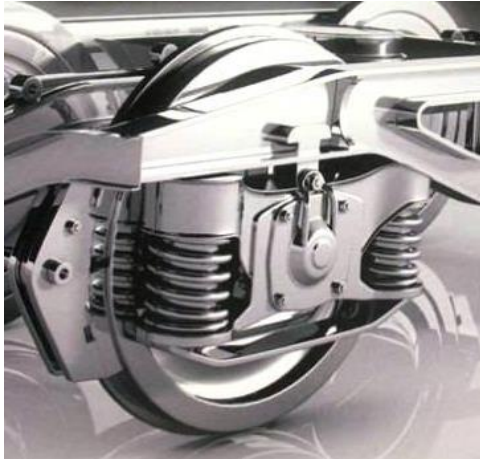


Ilustración 12-Resortes helicoidales

- **Amortiguadores:** dispositivo que retorna en un corto periodo de tiempo el resorte a su estado de inicio, con ello absorbe la energía cinética de la masa suspendida. Las clases de amortiguadores usados son:

Amortiguadores de fricción→ su efecto atenuador se produce mediante el rozamiento de cuerpos secos no lubricados. Usados en vagones de mercancías(*ilustración 13*).

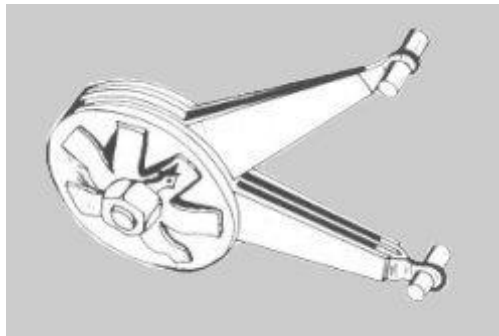


Ilustración 13-Amortiguador de fricción

Amortiguadores hidráulicos→ usado en transporte de pasajeros, su fuerza de amortiguación depende de la velocidad. Consta de un pistón que se localiza dentro de un cilindro y en donde se coloca aceite en ambos lados. Entre estos amortiguadores tenemos los de bitubo y los monotubo, que a su vez pueden ser presurizados o no presurizados (*ilustración 14*).

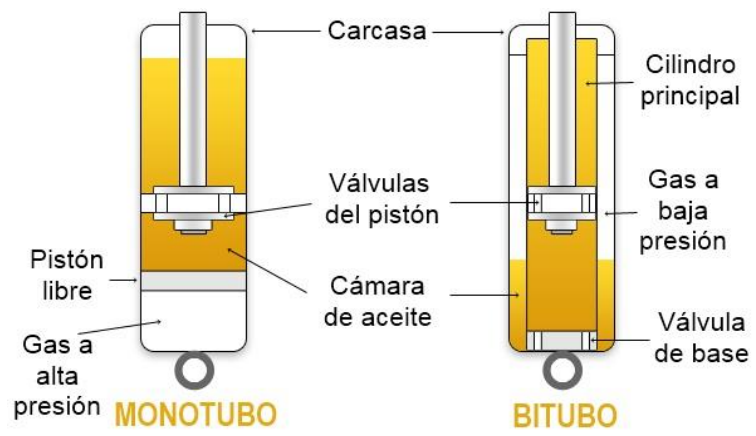


Ilustración 14-Amortiguadores bitubo y monotubo

Vibración Mecánica:

Se entiende por vibración mecánica a la oscilación de las partículas de un sistema físico alrededor de una posición de equilibrio.

Todo sistema mecánico se encuentra sometido a la acción de fuerzas variables en el tiempo, estas contribuyen a la variación de los estados de equilibrio de los elementos que conforman el sistema, cambiando la configuración inicial y como consecuencia genera un mal funcionamiento de manejo, así como disminución de la vida útil de los elementos que constituyen el sistema.

Estas vibraciones se expresan mediante señales, las cuales pueden ser representadas en el dominio del tiempo (oscilograma-*ilustración 15*) y en el dominio de la frecuencia (espectrograma-*ilustración 16*).

Las partes que describen una señal vibratoria son:

- **Amplitud:** señala la magnitud de la señal vibratoria.
- **Tiempo o Frecuencia:** determina el compás de la vibración.
- **Fase:** define su ubicación respecto a otras señales.

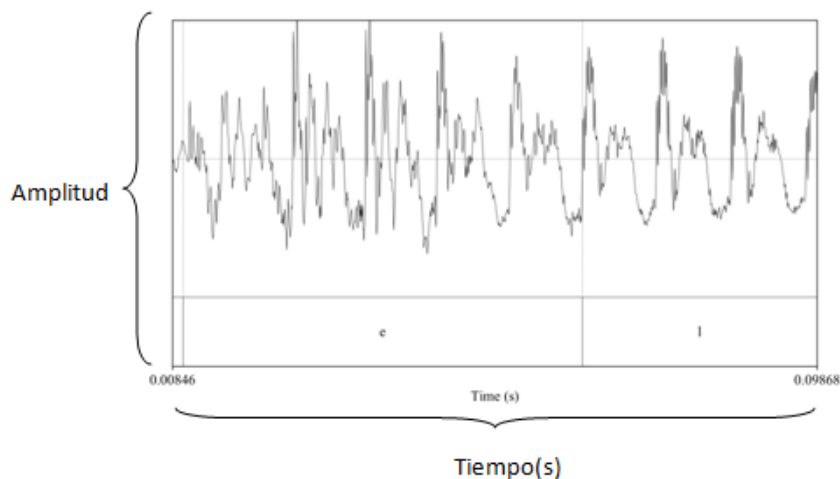


Ilustración 15-Oscilograma

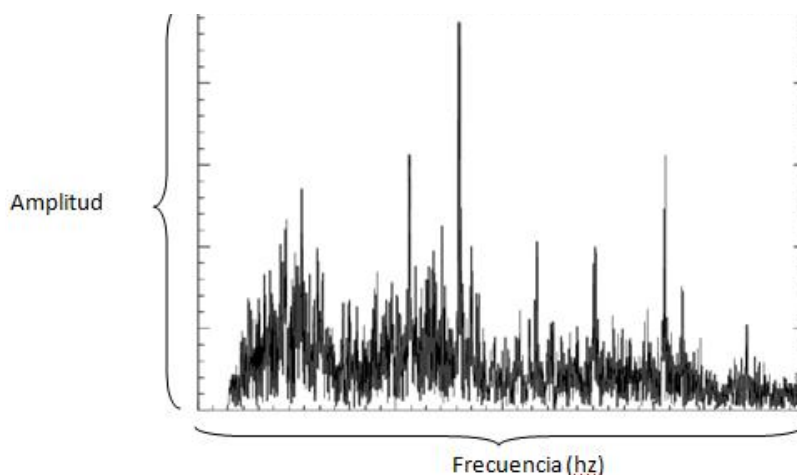


Ilustración 16-Espectrograma

Clasificación de las señales vibratorias:

Las señales vibratorias se pueden catalogar teniendo en cuenta:

- La excitación
- La disipación de energía
- Linealidad
- Características de las señales

La excitación:

Las señales clasificadas por excitación pueden ser:

- Vibraciones libres → aquellas en donde la perturbación o excitación se manifiesta de forma instantánea. (Ej: niño saltando en una cama elástica)
- Vibraciones forzadas → aquellas en donde la perturbación o excitación se manifiesta de forma permanente. (Ej: una persona empujando a otra en un columpio)

Disipación de energía:

Las señales clasificadas por disipar energía son:

- Vibraciones amortiguadas → cuando la frecuencia de oscilación se ve afectada por la disipación de energía. (Ej: automóvil se topa con un bache, rebota y el amortiguador permite que el rebote disminuya rápidamente)
- Vibraciones no amortiguadas → cuando la frecuencia de oscilación no se ve afectada por la disipación de energía. (Ej: niño saltando en una cama elástica)

Linealidad:

Se clasifica como sistema lineal aquella en donde si la actuación de los elementos que constituyen el sistema es lineal por lo que la vibración del sistema debe ser lineal; este tipo de clasificación se podría considerar obsoleta ya que no hay sistema el cual sus parámetros sean completamente lineales.

Entre los ejemplos de vibración lineal se podría mencionar la **Ley de Hooke** (fuerza y deformación de un resorte es casi lineal) y no lineal podría considerarse el sistema ferroviario.

Características de la señal:

Los tipos de señales que encontramos son:

- **Vibraciones probabilísticas**→ es aquella en donde la señal presenta ciclos de movimiento variables por lo cual no se pueden predecir (*ilustración 17*).
- **Vibraciones deterministas**→ aquellas que se pueden expresar por ecuaciones matemáticas ya que sus ciclos de movimientos son predecibles (*ilustración 18*).

Entre estas señales, podemos diferenciar aquellas que después de un intervalo determinado de tiempo repiten las mismas características, estas son denominadas vibraciones periódicas; y de ellas podemos encontrar las que tienen una forma senoidal y otras de forma compleja.

Las señales de forma compleja son aquellas que de primera mano no se pueden representar por una ecuación matemática, pero si es periódica mediante el método de Fourier podemos descomponerla en diferentes señales del tipo seno y cosenos.

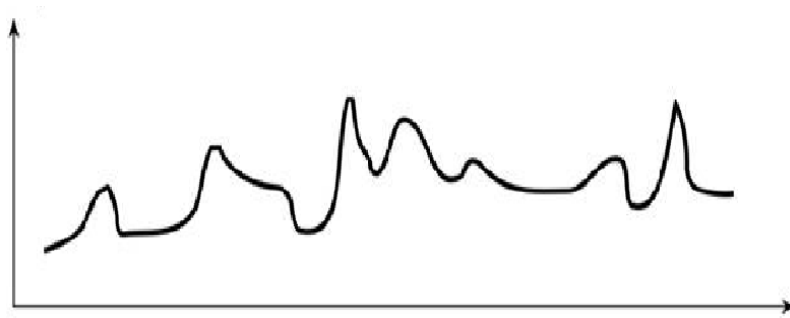


Ilustración 17-Señal probabilística

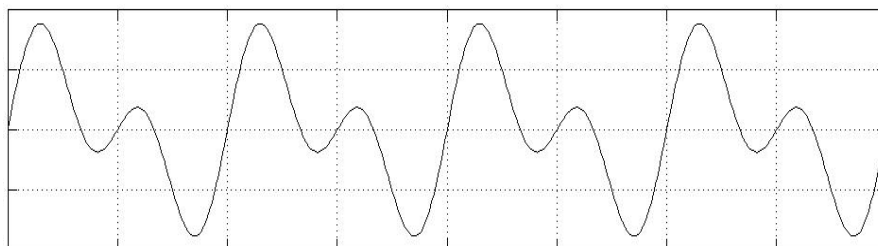


Ilustración 18-Señal determinista

Análisis de las señales vibratorias:

El estudio de la señales vibratorias radica en el uso de un instrumento de medición de vibraciones denominado acelerómetro, el cual registrará las señales del sistema mecánico y por medio de procesos matemáticos obtendremos patrones vibratorios que nos permitirán estudiar el comportamiento de las señales y así poder predecir las deficiencias en el sistema.

- **Análisis Temporal**

Las señales obtenidas del sistema a través del acelerómetro son del tipo temporal ya que representan la variación de la amplitud a lo largo del tiempo. Una manera de detectar fallos es viendo dichas variaciones en las representaciones del dominio del tiempo, ya que así podremos detectar donde hay deficiencias del sistema.

Pero el problema de este análisis deriva en que las señales obtenidas del sistema son tan complejas que las alteraciones no se pueden apreciar y la descomposición de esta en otras señales es muy dificultosa por lo cual solo la utilizaremos como base elemental física para su posterior estudio.

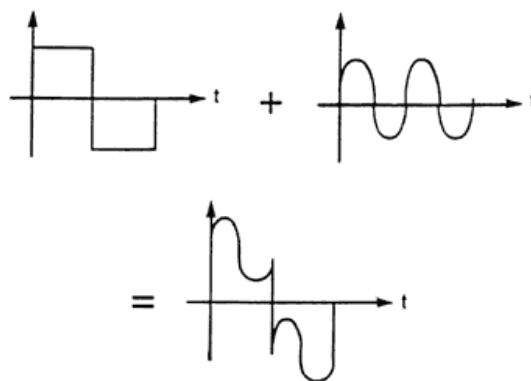


Ilustración 19-Suma de señales

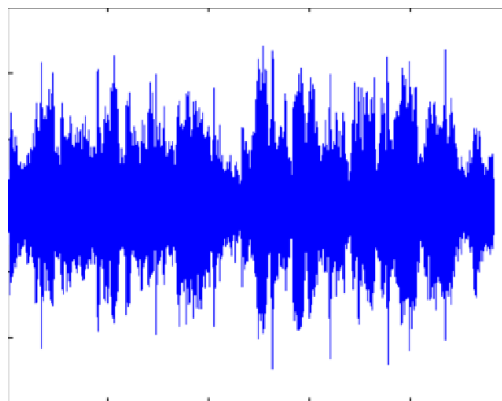


Ilustración 20-Señal compleja

Observamos en la **ilustración 19** la señal obtenida presenta unas variaciones muy grandes respecto a las iniciales, por lo cual, si analizamos una señal como la **ilustración 20** la obtención de sus señales básicas, así como la visualización de sus variaciones son muy poco claras.

• Análisis de Frecuencias

El objetivo de este análisis en el dominio de la frecuencia es el de descomponer la señal compleja otorgada por el transductor en otras señales básicas y así permitirnos un estudio más asequible.

La representación obtenida en el dominio de la frecuencia se le denomina espectro de frecuencias; el cual nos da un punto de vista alternativo de la señal como una superposición de sinusoides de frecuencias diferentes.

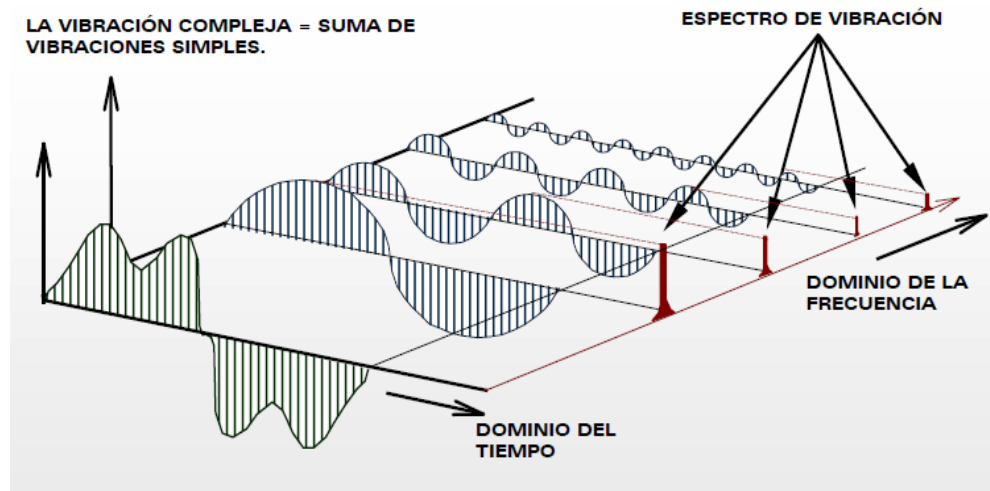


Ilustración 21-Señal representada en el tiempo y frecuencia

Como se observa en la **ilustración 21** la señal compleja está formada por varias sinusoides y estas mediante un cambio al dominio de la frecuencia observaremos con claridad cada señal que la compone y la amplitud de cada una con gran evidencia y sin perder información.

Para el paso del dominio del tiempo al de frecuencia se empezó utilizando analizadores de espectros análogos mediante filtros pasobanda, pero con la ayuda del algoritmo de la "Transformada de Fourier" en los softwares matemáticos se ha implantado el uso de elementos digitales que tienen el algoritmo.

• Transformada de Fourier

Las señales que se han obtenido del acelerómetro se encuentran en el dominio del tiempo y son demasiado complejas para un estudio temporal, para ello y con la finalidad de no perder información se remitirá al uso del análisis frecuencial ya que nos mostraran los picos de las señales más influyentes.

Para ello realizares un análisis armónico de las señales obtenida que, de acuerdo con el teorema de Fourier, una función $f(t)$ puede ser representada de la siguiente manera:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \sen \frac{2n\pi t}{T} \right) \quad (1)$$

Donde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sen \frac{2n\pi t}{T} dt \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2), (3) y (4) en la ecuación (1):

$$\begin{aligned} f(t) = & \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) d\gamma \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left[\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) \cos \frac{2n\pi \gamma}{T} d\gamma \right] \cos \frac{2n\pi t}{T} \right. \\ & \left. + \left[\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) \sen \frac{2n\pi \gamma}{T} d\gamma \right] \sen \frac{2n\pi t}{T} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Según trigonometría:

$$\cos(a - b) = \cos(a) * \cos(b) + \sen(a) * \sen(b)$$

Entonces teniendo en cuenta lo anterior la ecuación (5):

$$\begin{aligned} f(t) = & \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) d\gamma \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) \cos \left[\frac{2n\pi}{T} (t - \gamma) \right] d\gamma \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Sustituyendo según su frecuencia angular en la ecuación (6):

$$\omega_n = \frac{2n\pi}{T}, \omega_{n-1} = \frac{2(n-1)\pi}{T}, \Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1} = \frac{2\pi}{T}$$

$$f(t) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) d\gamma + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} f(\gamma) \cos[\omega_n(t - \gamma)] d\gamma \right) \quad (7)$$

Y si $T \rightarrow \infty$ la ecuación (7) será:

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} f(\gamma) \cos(\omega(t - \gamma)) d\gamma \quad (8)$$

La ecuación (8) se denomina integral de Fourier de la cual obtendremos la Transformada de Fourier.

Teniendo en cuenta que $T \rightarrow \infty$ y los cambios de las ecuaciones (3) y (4) en función de la frecuencia angular tendremos:

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\gamma) \cos(\omega\gamma) d\gamma \quad (9)$$

$$b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\gamma) \sen(\omega\gamma) d\gamma \quad (10)$$

Y sustituyendo las ecuaciones (9) y (10) en (8):

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (a(\omega) \cos\omega t + b(\omega) \sen\omega t) d\omega \quad (11)$$

Por último, si definimos:

$$\sen\phi(\omega) = \frac{-b(\omega)}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}} \quad (12)$$

$$\cos\phi(\omega) = \frac{a(\omega)}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}} \quad (13)$$

$$\cos a * \cos b - \sen a * \cos b = \cos(a + b) \quad (14)$$

$$\cos\phi = \frac{(e^{i\phi} + e^{-i\phi})}{2} \quad (15)$$

Sustituimos las ultimas 4 ecuaciones en la ecuación (11):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} (e^{i(\omega t + \phi(\omega))} + e^{-i(\omega t + \phi(\omega))}) d\omega$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (15)$$

De la ecuación (15) podremos localizar la función compleja:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

Esta ultima ecuación es denominada la **Transformada de Fourier** para señales continuas.

Pero como no trabajamos con señales continuas sino con señales que muestran instantes determinados en el tiempo, cada instante separado por un intervalo de muestreo y con N cantidad de muestras.

Para este caso se utilizará una variante de la Transformada de Fourier denominada **Transformada Discreta de Fourier**, utilizada para señales que tenga duración finita:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{\frac{-2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N-1$$

Tenemos que mencionar que para poder proceder al uso de la transformada de Fourier debemos hacer una correlación de la función inicial y a partir de esta hacer su transformada para obtener su espectro.

Pero todo lo mencionado no será necesario si hacemos uso de la **Transformada Rápida de Fourier**, la cual subdivide la función inicial en otras más pequeñas para luego aplicar la transformada discreta, luego combinarlas y obtener la original. De esta manera simplificamos los cálculos y hacemos que el programa trabaje con mayor rapidez.

- Aspectos a tener en cuenta en señales

Aliasing (efecto solapamiento)

Cuando se produce la toma de muestras de la señal, debemos tener cuidado para evitar una situación como en la *ilustración 22*:

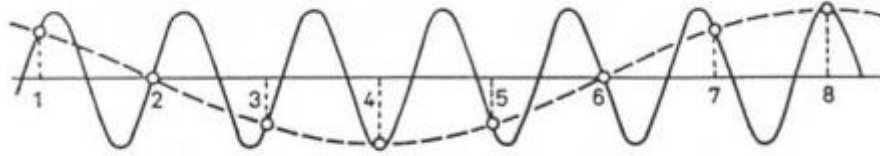


Ilustración 22-Efecto solapamiento

En toda función que está limitada por banda, debe estar presente la frecuencia máxima, la cual corresponde al periodo más corto de la función considerada por lo que:

$$F(\omega) = 0 \text{ para } |\omega| > 2\pi f_{\text{máx}}$$

Para ello debemos tomar un intervalo de muestreo T , tal que:

$$T \leq \frac{T_{\text{min}}}{2} \rightarrow T \leq \frac{1}{2f_{\text{máx}}} \rightarrow 2f_{\text{máx}} \leq \frac{1}{T}$$

Tomamos $1/2$ de T_{min} como límite, ya que debemos tomar 3 puntos como mínimo para la digitalización de un periodo, por lo tanto, dos intervalos de muestreo. Con ello hacemos que la frecuencia de muestreo sea 2 veces la frecuencia máxima.

$$\frac{1}{T} = 2f_{\text{máx}} \quad (17)$$

La ecuación (17) es denominada como frecuencia de Nyquist, de tal manera que si $1/T$ es menor que la frecuencia de Nyquist no será posible obtener el verdadero espectro de la función. Este efecto debe ser evitado a toda costa con una adecuada frecuencia de muestreo.

Leakage (manchado espectral)

Es un efecto que se produce en señales finitas extraídas de señales infinitas, como trabajamos con señales discretas esto producirá problemas cuando obtengamos el espectro, ya que no obtendremos frecuencias discretas sino difuminadas.

Por lo tanto, la duración de la muestra debe ser lo suficientemente grande, para que no se solapen y se distingan, ya que la dispersión es de suma importancia ya que genera errores en los cálculos se utilizaran funciones ventanas espectrales o longitud de ventanas adecuadas que permiten un alisado y reducción de la amplitud.

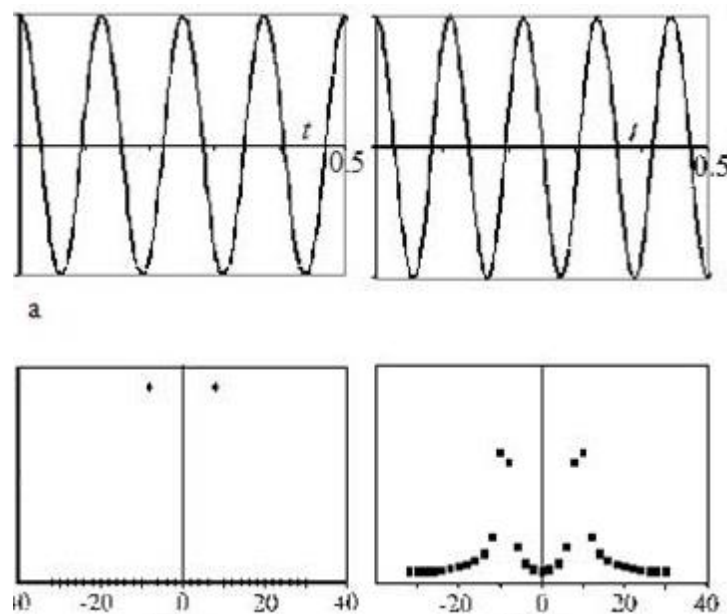


Ilustración 23-Manchado espectral

Como se observa en la **ilustración 23** al tener señales con periodos no completos generan en el espectro dispersiones no deseadas.

• Análisis estadístico de vibraciones:

Para un análisis de vibraciones en el dominio del tiempo hemos utilizado debido a la gran cantidad de datos:

Varianza

En teoría de probabilidad la varianza es aquella medida de dispersión que ostenta una variable aleatoria respecto a su esperanza, que es el cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

$$S = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Leyenda:

S:varianza

σ :desviación típica

\bar{X} :media aritmética de los datos

n: número total de datos

X_i : datos registrados

Curtosis

Es una medida de forma que mide cuán escarpada o achatada está una curva de distribución. Este coeficiente indica la cantidad de datos que están más cercanos a la media, por lo tanto, entre mayor grado de curtosis mas apuntalada será la curva de distribución.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n\sigma^4}$$

Leyenda:

C:curtosis

σ :desviación típica

\bar{X} :media aritmética de los datos

X_i : datos registrados

n: número total de datos

Tres tipos de curtosis (*ilustración 24*):

- **Leptocúrtica (C>0)**: datos concentrados en la media, curva apuntalada.
- **Mesocúrtica (C=0)**: distribución normal.
- **Platicúrtica (C<0)**: poca concentración de datos respecto la media, curva achatada.

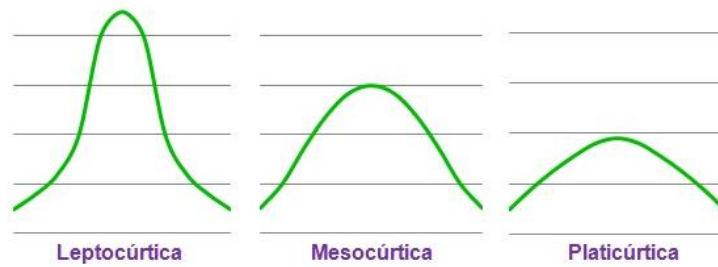


Ilustración 24-Tipos de Curtosis

RMS (media cuadrática)

Medida estadística de la magnitud de una cantidad variable.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2}$$

Leyenda:

RMS: media cuadrática

n: número total de datos

X_i : datos registrados

HERRAMIENTAS EMPLEADAS

MATLAB

Su nombre proviene de "MATrixLABoratory", un software de cálculo técnico que ofrece un entorno de desarrollo integrado, el cual tiene un propio lenguaje de programación. Es un entorno que nos permite resolver de manera versátil los problemas matemáticos, así como la visualización de graficas en 2-D y 3-D.

En este apartado explicaremos el entorno MATLAB y los comandos básicos de programación usados en el proyecto.

1. Menú principal

En este caso el tipo de MATLAB usado será R2013b, al ingresar en MATLAB por defecto nos aparecerá el menú principal (*ilustración 25*).

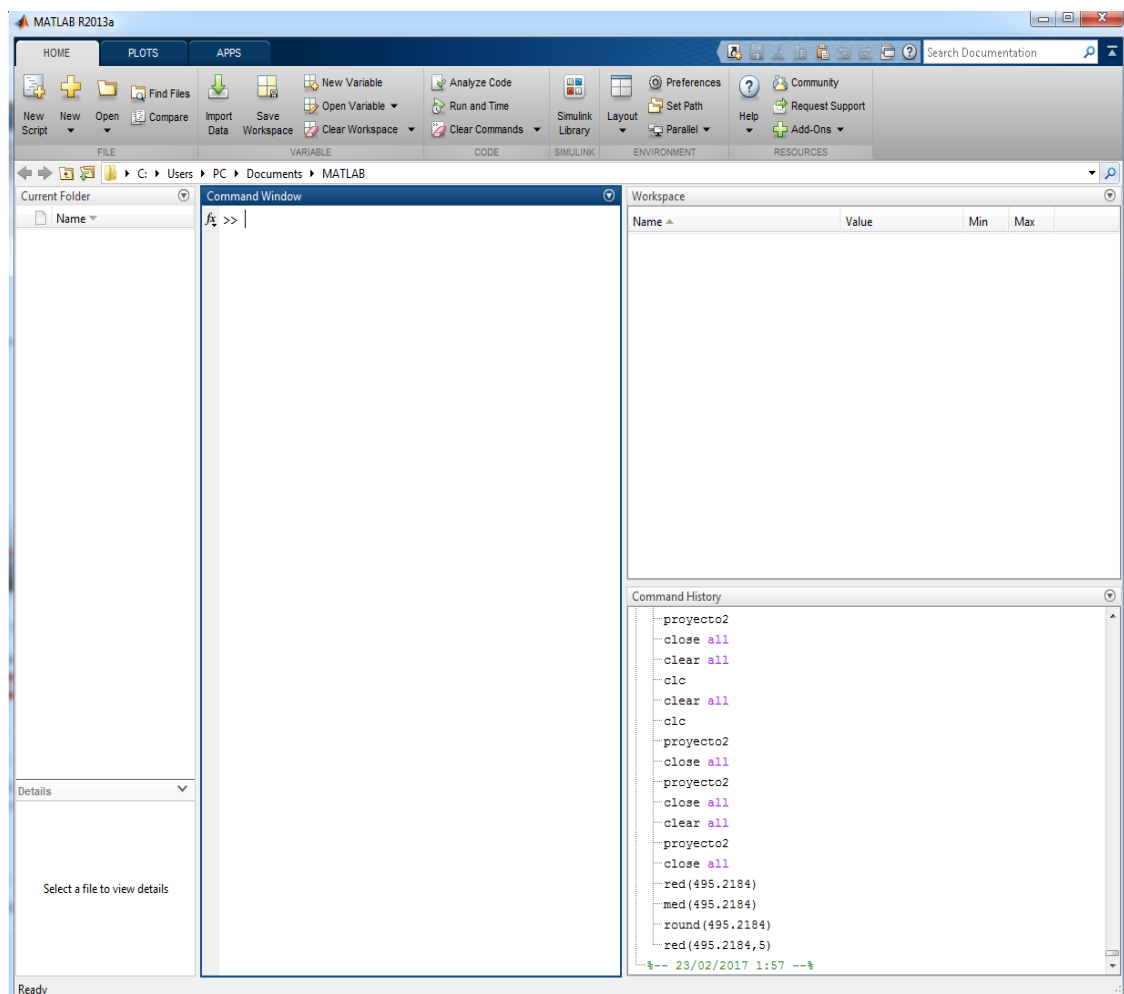


Ilustración 25-Menú principal de MATLAB

En el podremos apreciar:

- **Current Folder:** aquí se mostrarán los archivos que se utilizan o se han generado por el programa MATLAB.
- **CommandWindow:** ventana en donde se puede resolver directamente problemas de cálculo.
- **Workspace:** sector donde se guardan las matrices, vectores y números usados en el entorno.
- **CommandHistory:** aquí se muestran todas las operaciones que se han generado en la ventana CommandWindow, es decir, un historial de lo que hicimos.
- **HOME:** es una barra de herramientas con diferentes iconos de trabajo, pero de ellos destacaremos el icono NEW(script) y OPEN(script), ya que con ellos entraremos a una nueva ventana en blanco donde crearemos nuestro código de programación (*ilustración 26*).

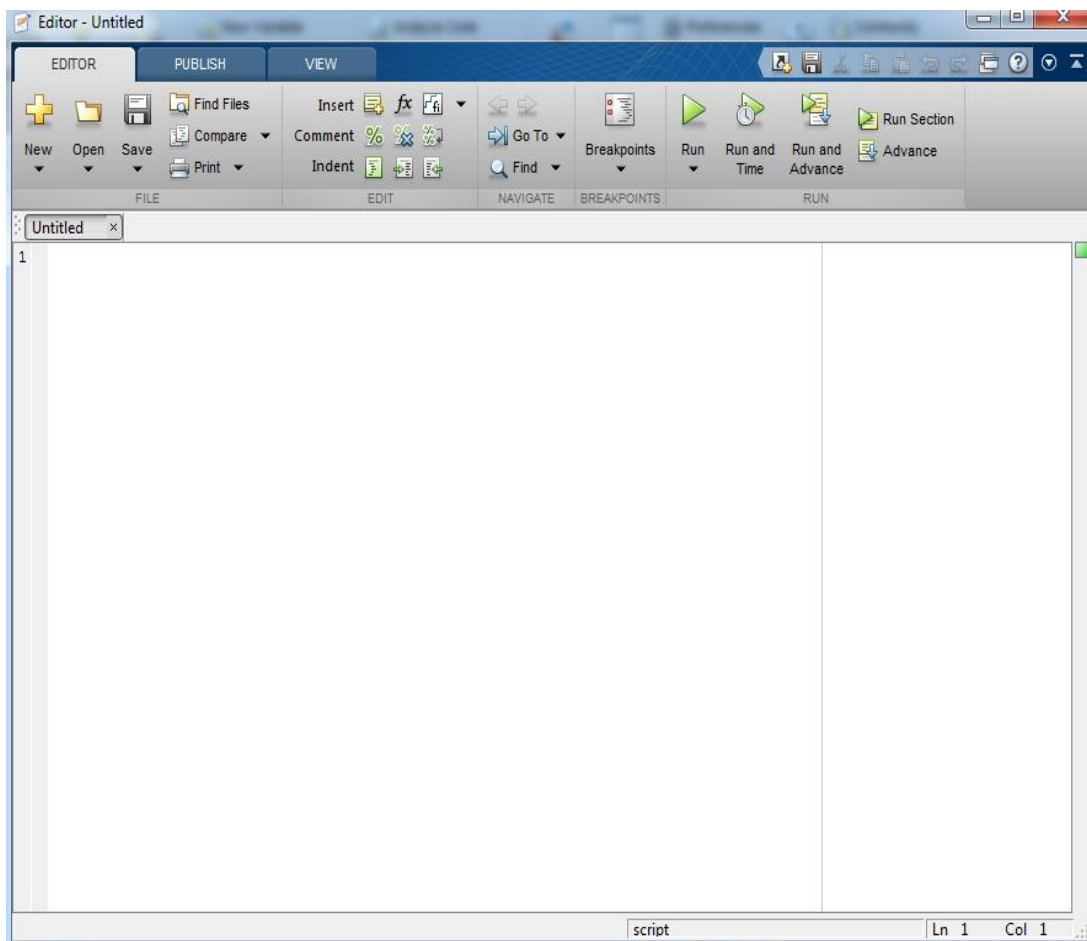


Ilustración 26-Ventana "Script"

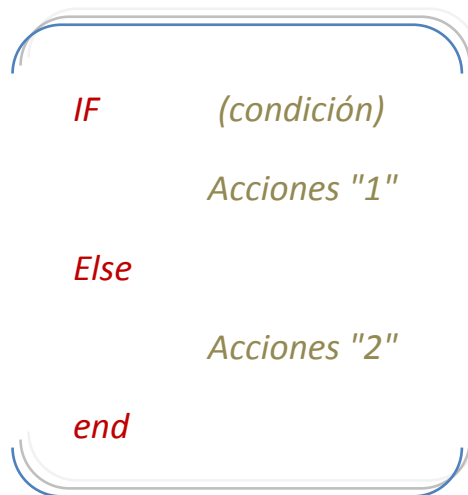
2. Comandos de programación

Como es un programa en donde se analizarán señales, el uso de vectores y matrices será muy utilizado, así como herramientas que nos permitan recorrer sus columnas y filas de tal manera que podamos usar los datos guardados en ellos.

Entre estos comandos tenemos:

- **"IF"**

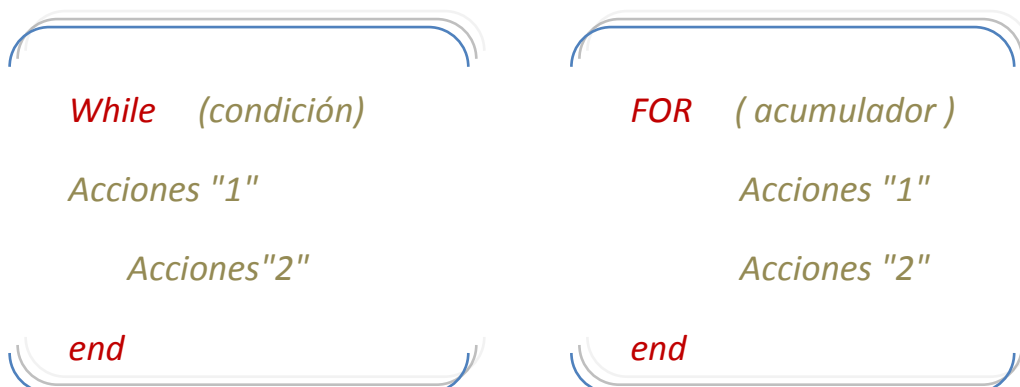
Comando que actúa sobre una proposición booleana con dos posibles valores recíprocamente excluyentes.



Este comando servirá como selector de filtros en el programa realizada.

- **"WHILE" y "FOR"**

Comandos iterativos, es decir, sirve para acciones que permiten repeticiones de varias acciones.



Estos comandos servirán para poder recorrer las matrices y vectores, así como realizar una variedad de operaciones en un solo bloque de código.

- **"PLOT" y "BAR"**

Para poder generar los gráficos de líneas y barras en el programa, haremos uso de estos comandos.

Plot (*datos del eje de las abscisas, datos del eje de las ordenadas*)

En la parte de los datos se introducirán los archivos vectoriales para producir los gráficos de líneas (Oscilograma, Espectrograma y Perfil de velocidades).

Bar (*datos del eje de las abscisas, datos del eje de las ordenadas*)

En este caso también será lo mismo que el "PLOT" solo que en vez de un gráfico de líneas tendremos uno de barras (varianza, curtosis, media cuadrática y frecuencias más repetidas).

*ORGANIZACIÓN,
METODOLOGÍA
Y DESARROLLO
DEL PROYECTO*

Organización

En este apartado se describe el conjunto de procedimientos implementados, para poder hacer entrega del estudio de señales vibratorias.

La realización del proyecto se ejecutó de manera ordenada y paulatina, durante la cual el creador del estudio hizo uso de entre 10-12 horas a la semana para su realización, es decir, una media de hora y media por día aproximadamente.

El tiempo empleado entre cada uno de los procedimientos fue el siguiente:

- Explicación y recepción de los datos. (1 día)
- Documentación del tema a estudiar de forma genérica. (4 meses).
- Manejo del software matemático MATLAB. (3 semanas)
- Esbozar los objetivos que se esperan al realizar el proyecto. (1/2 semana)
- Creación de un sistema de análisis para las señales vibratorias. (3 semanas)
- Desarrollo de un código de programación automatizado en MATLAB . (2 meses)
- Representación y estudio de los resultados obtenidos por el software diseñado. (1 mes)
- Realización del corolario del estudio. (1 semana)
- Redacción de la memoria. (2 meses)

Metodología

Cuando nos referimos a metodología, tramos de explicar los pasos prácticos que se han seguido para obtener las señales vibratorias analizadas (*ilustración 29*).

Para ello empezaremos explicando que los datos obtenidos serán de una caja de grasa de un bogie de un vagón de carga de pasajeros perteneciente a un AVE serie 100-101(*ilustración 27*) de la empresa Renfe, el cual realiza el trayecto Sevilla-Madrid.

Las vibraciones realizas por el sistema ferroviario y serán tomadas por acelerómetros, para ello serán ubicados en la caja de grasa del bogie con un previo acondicionamiento de limpieza y localización.

Los acelerómetros están pensados para realizar una medida de aceleración o vibración, proporcionando una señal eléctrica según la variación física.



Ilustración 27-AVE serie 100

Para la cantidad de datos a obtener se ha decidido el uso de un total de 6 acelerómetros, 3 en cada lado del sistema ferroviario y ubicados en las direcciones longitudinal, axial y vertical (*ilustración 28*).

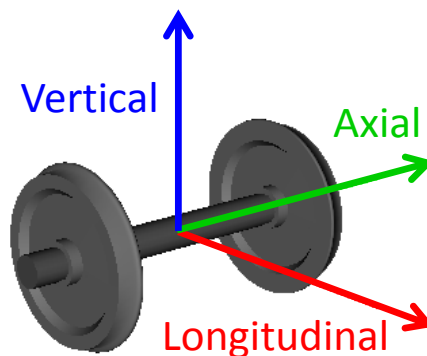


Ilustración 28-Ejes de ubicación de los acelerómetros

Una vez terminado la instalación de los acelerómetros se realizara a la toma de datos, que consiste en recepción de las vibraciones por parte de los acelerómetros en tres direcciones durante tres recorridos (Sevilla-Madrid, Madrid-Sevilla y Sevilla-Madrid).

Las señales eléctricas dadas por los transductores pasaran por un amplificador, el cual se encargará de deshacerse de señales indeseadas que dañen las muestras recibidas, las cuales una vez terminado su paso por el amplificador se guardaran en una tarjeta de datos.

En la tarjeta de datos se tendrán un total de casi 3000 señales, pero solo trabajaremos con las señales tomadas desde un lado del bogie, es decir, un total de casi 1500 señales serán tratadas en el estudio.

Cada una de estas señales tendrá como datos obtenidos:

- Fecha y hora a la que se tomaron.
- Velocidad en el instante que se obtuvo la señal.
- El tipo de acelerómetro del cual lo recibimos (longitudinal, axial o vertical).
- Los datos obtenidos por señal serán de 2^{14} muestras, es decir, 16384 muestras de amplitudes de vibración, así como en el tiempo en los que fueron tomados, ya que las señales obtenidas generan oscilogramas debido a que están en el dominio del tiempo.

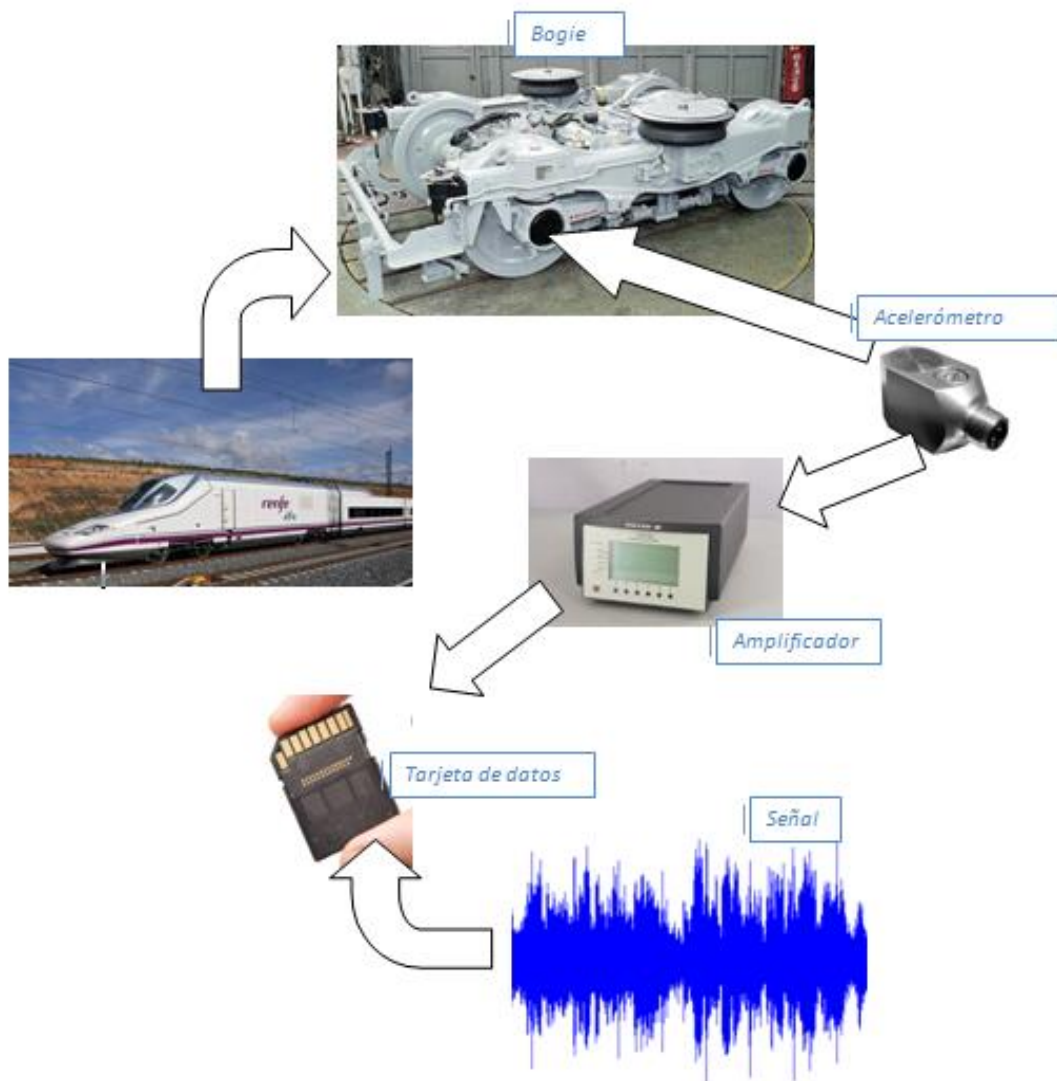


Ilustración 29-Metodología de toma de datos

Desarrollo del proyecto

Para que sea posible el desarrollo del programa debemos instaurar unas características básicas, los cuales permitirán obtener un informe en correcto orden y con la información necesaria integrada:

1. El documento o informe que se entregue una vez finalizado el programa debe solo tener representaciones de las señales y los patrones a estudiar.
2. Cada representación o gráfica deberá contener información básica de cada señal.
3. La programación de ser completamente automatizada, para su posterior uso en el análisis de las siguientes señales.

Una vez determinada las características del documento, se instaura una estructura (*ilustración 30*) para crear un código de programación que cumpla los requerimientos de nuestro documento:

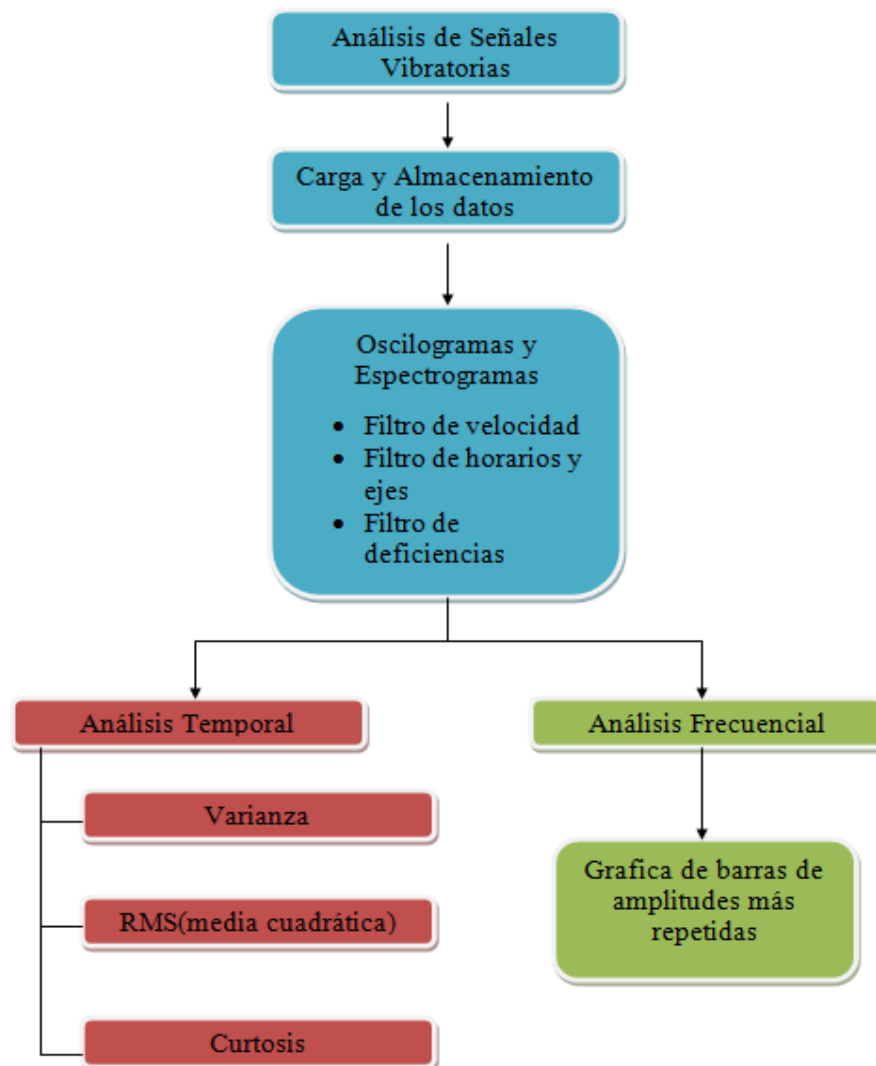


Ilustración 30-Estructura del código de programación

• Fase 1: Carga y Almacenamiento de datos

Antes de empezar el análisis de las señales, debemos saber las características de los archivos guardados en la tarjeta de datos:

- Tipo de archivo: MATData (.mat)
- Nombre: Measurement-ACC-EJE-FECHA-HORA

Por lo enumerado antes, los archivos recibidos son del tipo *.mat*, los cuales son totalmente abiertos por el programa de MATLAB, sin pasar por una conversión de archivo.

Los archivos guardados en la tarjeta de datos son de un total de 1432 archivos, cada uno llevara como nombre unas características típicas para su identificación. Se comenzará con el término Measurement que significa 'medición'; a continuación, se mencionaran el eje, fecha y hora en los que fueron obtenidos.

Terminada las observaciones de los archivos obtenidos, determinamos que el programa utilizado será el MATLAB-R2013b, el cual permitirá el desarrollo del código de programación.

Al entrar en el software matemático MATLAB, crearemos un nuevo 'sript' para crear nuestro código de programación, con lo cual nos valdremos de un comando especial del programa denominado:

```
dir('.*mat')
```

Este comando nos permitirá seleccionar la carpeta donde se encuentren las señales (*ilustración 31*), y dirigir de manera ordena todos los archivos al programa MATLAB; con esto terminaremos la carga de archivos (*ilustración 32*).

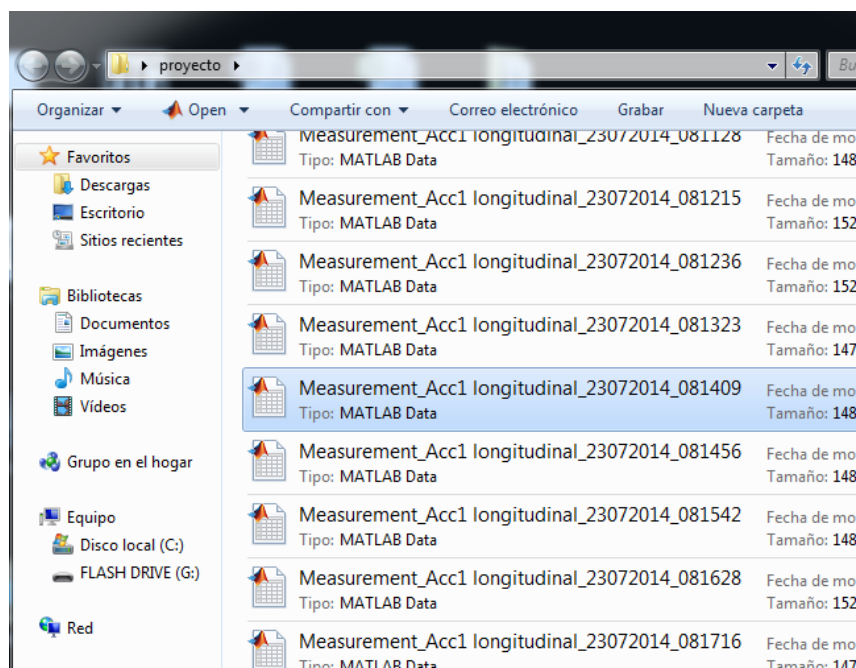


Ilustración 31-Carpeta de archivos

Cada uno de estos datos nos permitirán llamar a la señales de manera sencilla y organizada. Cuando se realiza una llamada de la señal, esta nos transportara a otra matriz en la cual se verán datos más explícitos de las señal (*ilustración 34*):

'IDNode'	'NodeName'	'MeasDate'	'WheelsetID'	'MeasInfo'	'TimeWavef...
9	'Acc3 vertic...	'23/07/2014...	'Bogie S-100'	<8x2 cell>	<16384x2 d...

Ilustración 34-Datos detallados de la señal

Y cada uno de estos llevaran otros datos más específicos de la señal, pero con los que más trabajaremos serán:

MeasInfo: el cual nos informa de las velocidades en la que se tomo la señal, así como las cargas, la dirección de rotación, eje, tamaño de la señal y frecuencia de muestreo.

TimeWaveform: el cual almacena los datos que conforman la señal en el dominio del tiempo.

	1	2
1	'Speed [cpm]'	1.4446e+03
2	'SpeedMin [cpm]'	1.4434e+03
3	'SpeedMax [cpm]'	1.4458e+03
4	'Load'	0
5	'Rotational direction'	0
6	'Axis'	1
7	'TimesignalLines'	16384
8	'SampleRate'	5120

Ilustración 36-MeasInfo de la señal en MATLAB

fichero.Measurement{2, 6} <16384x2 double>			
	1	2	3
1	1.9531e-04	11.5818	
2	3.9063e-04	20.0886	
3	5.8594e-04	-0.5097	
4	7.8125e-04	3.6635	
5	9.7656e-04	11.4579	
6	0.0012	1.2784	
7	0.0014	9.3628	
8	0.0016	-0.3914	
9	0.0018	11.4945	
10	0.0020	9.8950	
11	0.0021	30.1526	
12	0.0023	22.6482	
13	0.0025	11.0524	
14	0.0027	13.5175	

Ilustración 35-TimeWaveform (datos de amplitud y tiempo)

• Fase 2: Oscilogramas y Espectrómetros

Una vez terminado el almacenamiento de los archivos en MATLAB, se prosigue con creación del código de programación, teniendo en cuenta las características que debe tener nuestro informe final ya mencionado anteriormente (*página 37*).

Para ello debemos generar un determinado método de selección de señales, ya que no todas las señales serán analizadas, y eso es debido a que presentan distintas características. Por ello nos valdremos de filtros, que solo permitirán el análisis a aquellas señales que cumplan las siguientes especificaciones:

- Un filtro que nos indique las horas y a la misma vez en que recorrido se ha tomado, ya que los recorridos analizados son tres de una misma ruta. Por lo tanto este filtro será el inicio de nuestra programación ya que con el podremos separar los recorridos de cada señal usando las horas.

Para eso primero debemos crear un vector universal con todas las horas del inicio y final del recorrido. El código de programación constara de un algoritmo que recorre la estructura array de las señales para poder analizar sus datos mediante los bucles explicados en la *página 31*. En este bucle ejecutaremos unas acciones que nos separaran en tres vectores las horas de inicio y final de las señales, pero de cada eje.

Una vez obtenidos estos tres vectores se obtendrá el máximo valor de cada casilla, de este modo se conseguirá un vector universal de recorridos.

- Un rango de velocidades, en los cuales se consiga la mayor cantidad de señales para un correcto análisis vibratorio; así mismo el rango de velocidades no puede ser demasiado grande, ya que también debemos tener en cuenta que las señales a analizar deben tener una magnitud de velocidad similar para poder llevar a cabo las comparaciones y semejanzas entre señales y patrones.

Para ello nos valdremos del uso de un perfil de velocidades en cada eje, ya que con el podremos visualizar que rango consigue la mayor cantidad de señales.

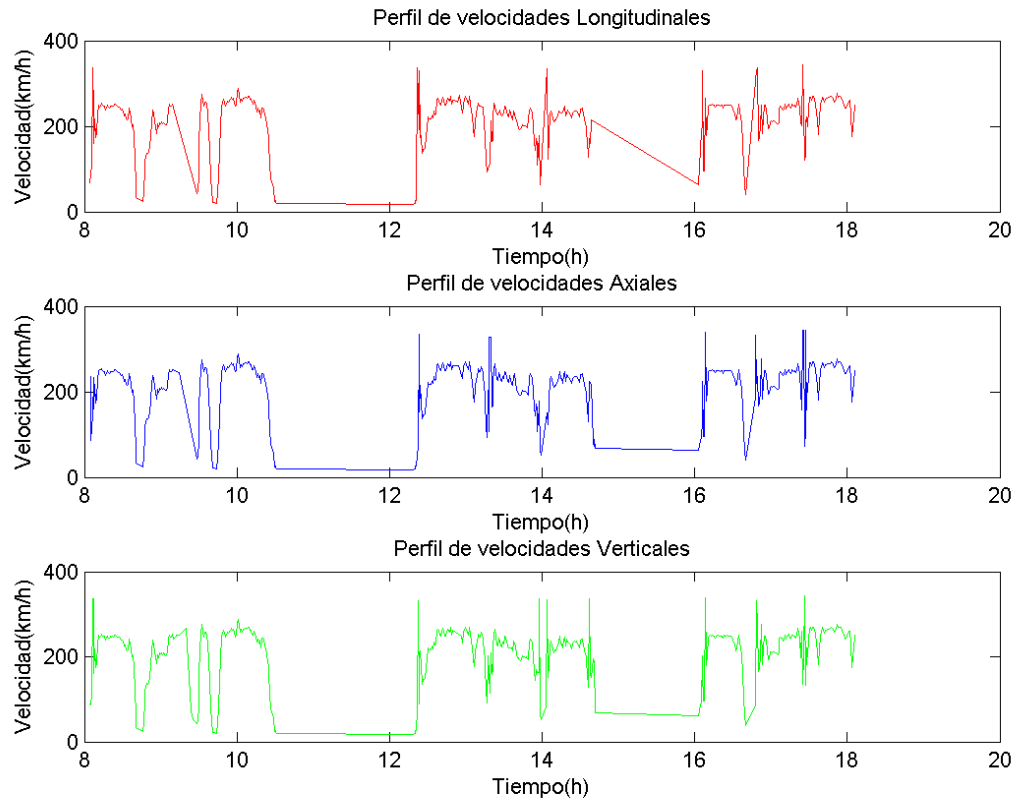


Ilustración 37-Perfil de velocidades en cada eje

Como se puede observar en los perfiles de velocidades (*ilustración 37*), los rangos en los que obtenemos mayor cantidad de señales es entre 260 Km/h y 280 Km/h; y será con este rango con el cual trabajaremos.

- El ultimo filtro constará como medida de seguridad, ya que podrían existir señales las cuales pasen por los filtros anteriores pero que presenten deficiencias o fallos.

Para ello haremos uso de un código de programación, el cual revisará la señal cada cierta cantidad de puntos y se generará la media de amplitudes de cada sector de la señal si las medias de cada uno no encajan(según un porcentaje de error), la señal será desestimada y eliminada de la selección.

Debemos tener en cuenta que las señales que pasen la selección, serán guardadas en un vector con el número de su archivo para su posterior procesamiento. Con los filtros ya fundamentados, se empezará con la representación de los oscilogramas y espectrogramas.

Par la representación de los oscilogramas de las señales que pasaron la selección será necesario el uso de otro bucle, el cual recorrerá el vector obtenido de los filtros. Con esto entraremos a las correspondientes señales y a sus datos de "TimeWaveform".

Como "TimeWaveform" es una estructura de 16384 filas y 2 columnas (amplitudes y tiempos), nos valdremos del comando "plot", para su posterior representación (*ilustración 38*).

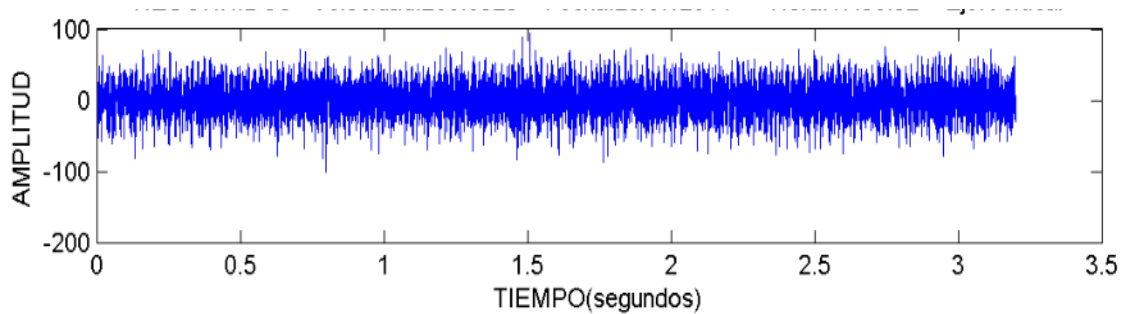


Ilustración 38-Oscilograma

Como se observa en la *ilustración 38* cada oscilograma deberá tener en su eje de las abscisas los datos del tiempo y en el eje de ordenadas las amplitudes.

A continuación, en el mismo bucle también obtendremos la grafica de espectro de frecuencias. Por lo tanto una vez producido el recorrido del vector de señales de la selección, utilizaremos el comando FFT(Transformada Rápida de Fourier) para obtener los valores del espectro de frecuencias cada uno guardados en un vector y en otro las frecuencias en las que se hallan.

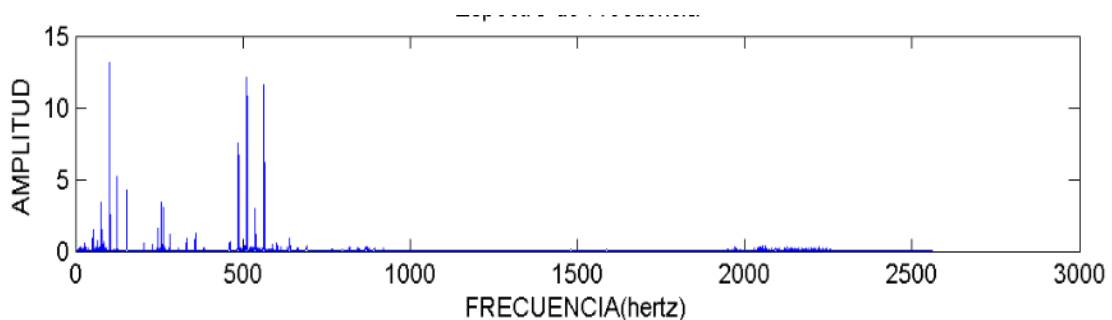


Ilustración 39-Espectro de frecuencia

En la *ilustración 39* podemos ver el espectro de frecuencia de una señal del informe realizado donde en su eje de las abscisas tendremos las frecuencias y en la ordenadas las amplitudes.

También como gráfico adicional, realizaremos el espectro en escala logarítmica en el eje de las ordenadas (*ilustración 40*), para poder apreciar mejor los picos de variaciones del espectrograma respecto a otras señales.

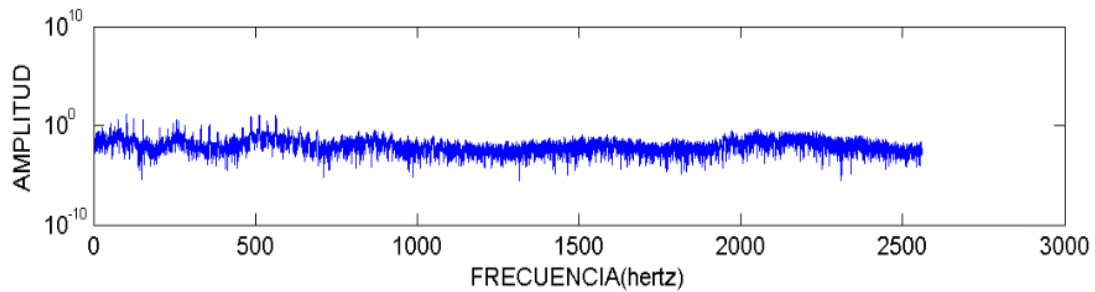


Ilustración 40- Espectrograma en escala logarítmica

Todas estas representaciones se realizarán en una sola ventana del MATLAB y consecutivamente aparecerán las siguientes; pero a su vez y cumpliendo con las condiciones impartidas al inicio *página 37*, cada una de estas graficas llevaran sus respectivos datos integrados para su correcta identificación.

Estos datos consistirán en:

- El recorrido al que pertenece la señal graficada.
- La velocidad en la que fue tomada la señal.
- La fecha y hora en el que se tomo la señal.
- El eje al que pertenece la señal obtenida.

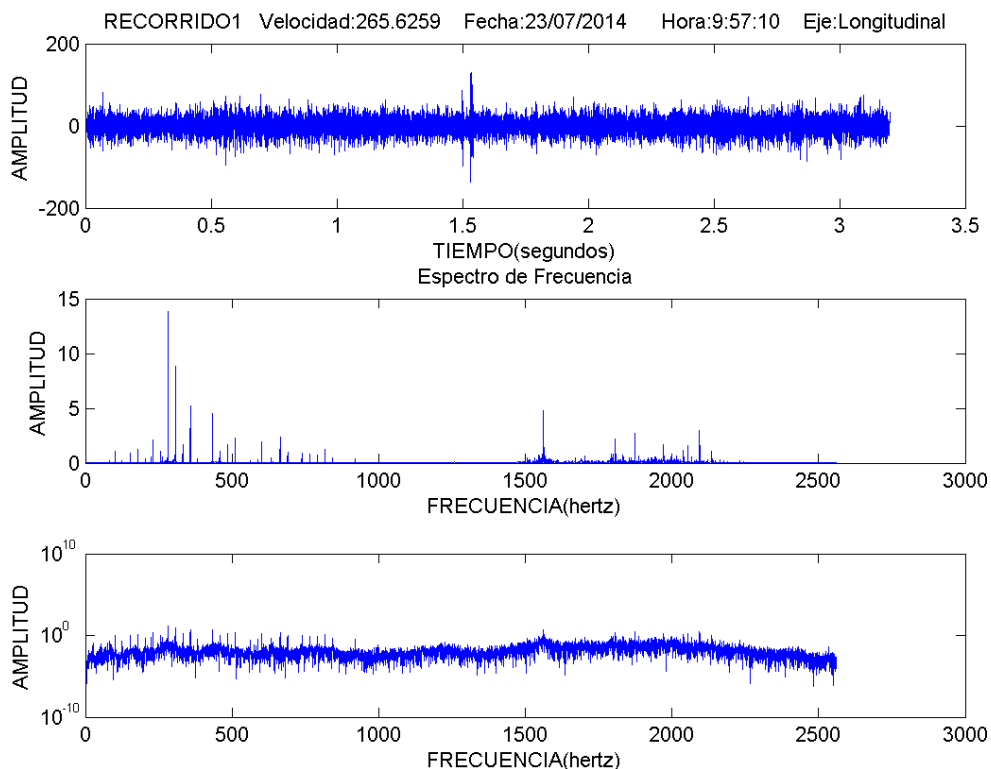


Ilustración 41-Representación de una señal perteneciente al recorrido 1.

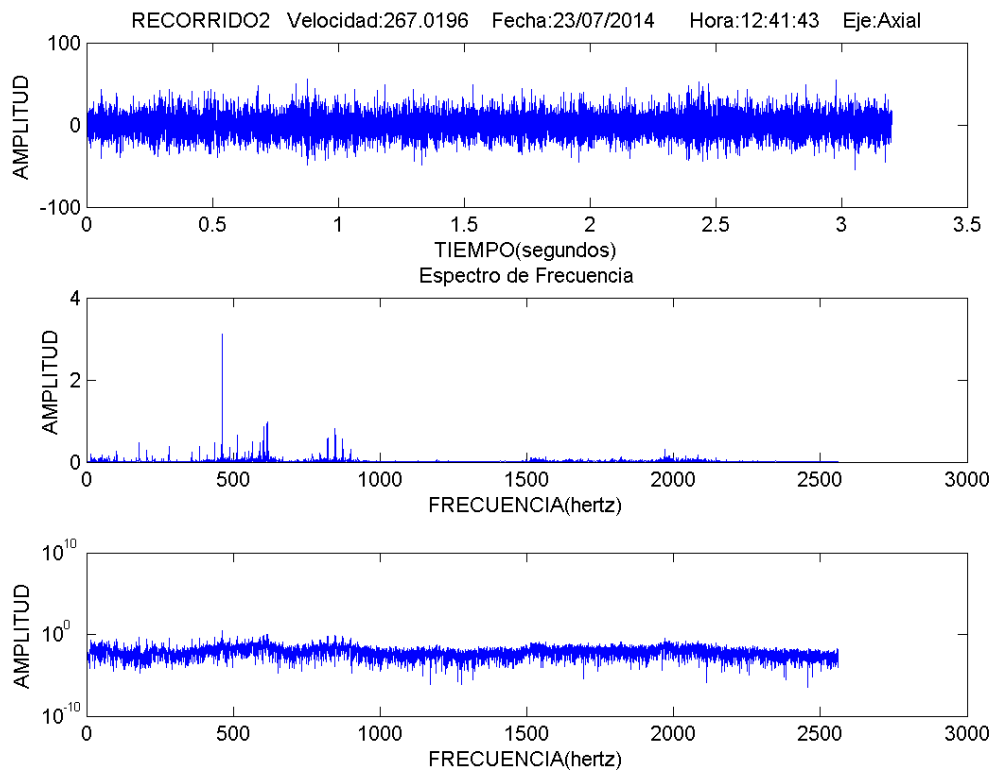


Ilustración 42-Representación de una señal perteneciente al recorrido 2.

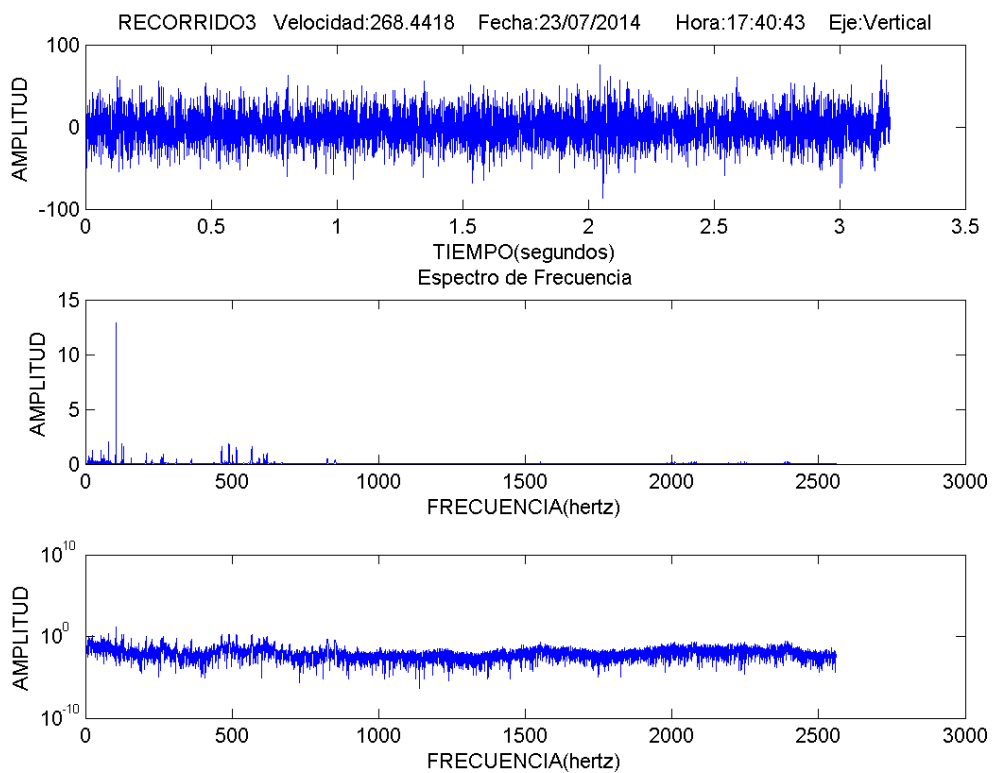


Ilustración 43-Representación de una señal perteneciente al recorrido 3.

Como podemos observar en las *ilustraciones 41, 42 y 43*, cada señal está totalmente diferenciada, ya que sabremos al recorrido al que pertenece, así como los datos de sus fechas, hora, velocidad y eje; así mismo cada uno tiene sus respectivas gráficas en el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y dominio de la frecuencia en sistema logarítmico.

• Fase 3: Análisis Temporal

Una vez terminada las representaciones de las señales con los sus datos más significativos, empezaremos en la creación de los códigos de programación del bloque de análisis temporal.

Para ello nos valdremos, de los datos del "TimeWaveform", los cuales están guardados en vectores del programa.

Para producirlos los distintos patrones estadísticos en el dominio temporal, nos apoyaremos de comandos propios de MATLAB, los cuales obtendrán los valores de esos métodos de análisis de cada señal, que se archivarán en un vector para su posterior representación gráfica.

Los métodos estadísticos empleados serán:

- La varianza--- comando en MATLAB → "var (vector)".
- La media cuadrática----comando en MATLAB → "rms (vector)".
- La curtosis----comando en MATLAB → "kurt (vector)"

Cada uno de estos métodos se aplicarán a cada señal que pase los filtros, y guardados en sus respectivos vectores obteniendo tres vectores de cada método.

Una vez terminado los vectores estadísticos, se realizará su representación de barras y también añadimos que cada patrón tendrá agrupados aquellas señales con la misma dirección, con lo que obtendremos tres patrones por cada método estadístico dando un total de 9 patrones.

En cada patrón dispone de la información necesaria para su identificación, así como una media de la varianza, media cuadrática y curtosis de cada patrón (*ilustraciones 44, 45 y 46*).

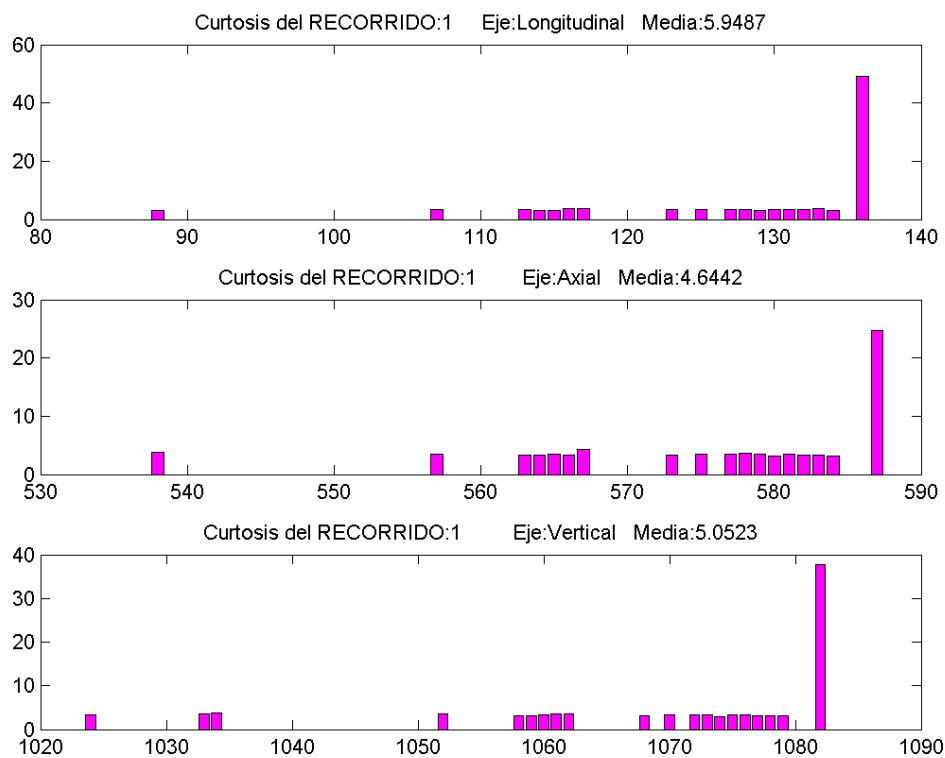


Ilustración 44-Patron estadístico de Curtosis del recorrido 1

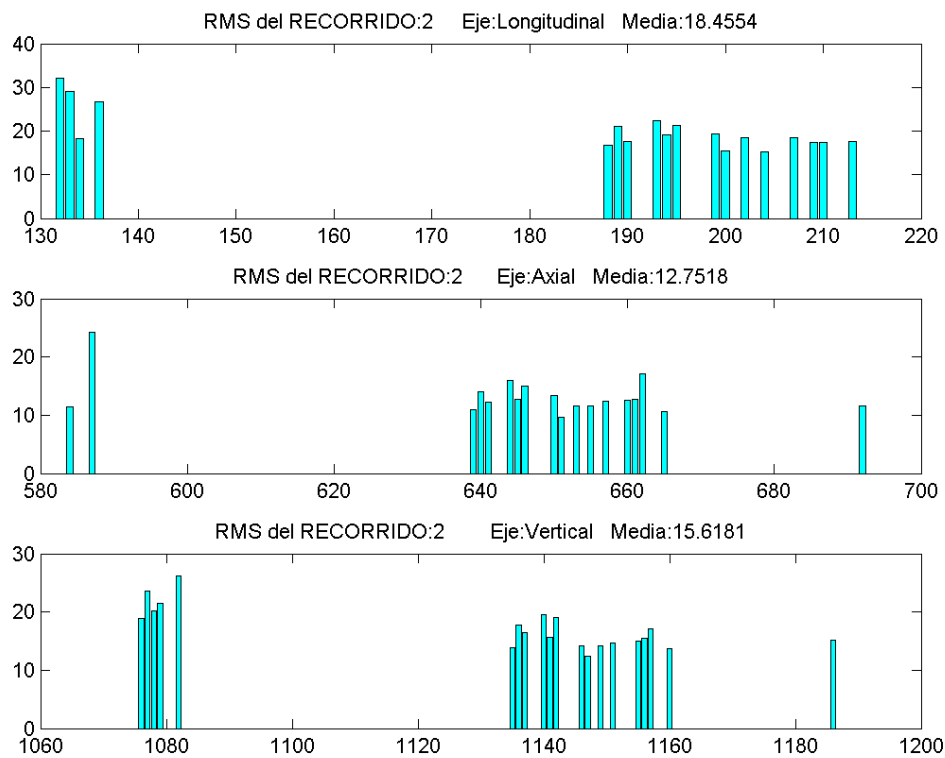


Ilustración 45-Patron estadístico de RMS del recorrido 2

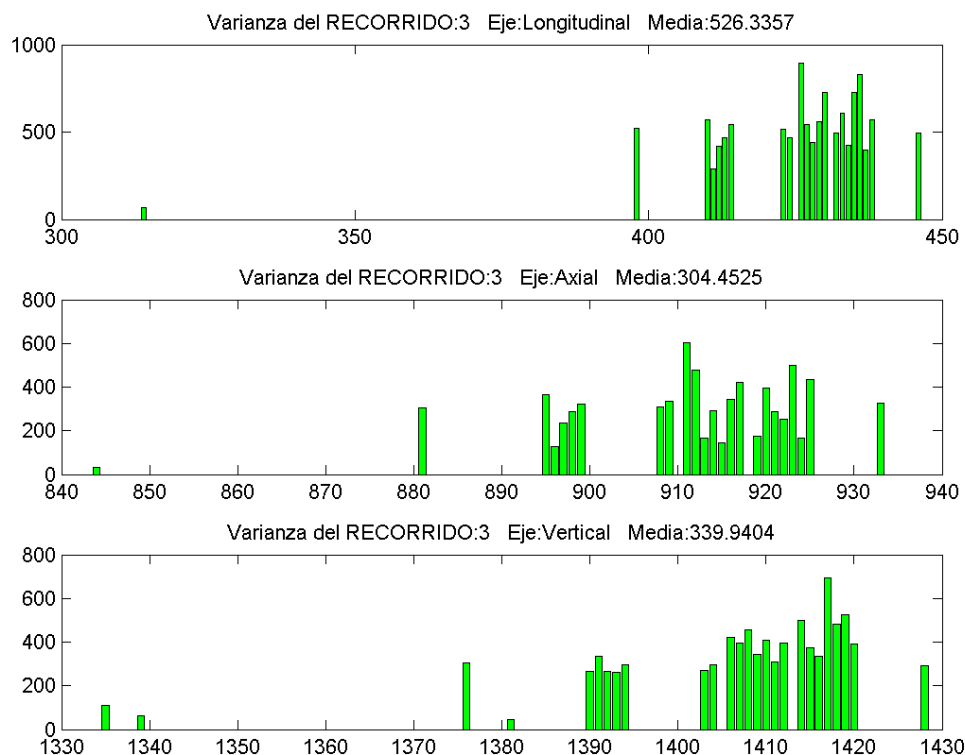


Ilustración 46-Patron estadístico de varianza en recorrido 3

• Fase 4: Análisis en Frecuencia

Como parte final del desarrollo del programa, se creará un código de programación para el patrón de frecuencia repetidas.

Para ello utilizaremos los datos obtenidos por el FFT que guardamos en una matriz y en otra se colocara las frecuencias correspondientes a las amplitudes del espectro.

Con el fin de generar un trabajo menos desordenado en el "script", nos valdremos de los comandos "**function**", es decir funciones, estos generarán pasos para obtener las frecuencias más repetidas.

El primer paso será el análisis de la matriz de amplitudes del espectrograma, la cual pasaremos por una función propia, que se encarga de obtener los picos más significativos del espectro. Una vez obtenido dicha matriz se realizará otra función, la cual nos permite hallar los 10 valores más significativos de entre todos los espectros obtenidos en la "fase 2" y ordenarlos de mayor a menor.

Terminado el trabajo con la matriz de amplitudes, se realizará el análisis de la matriz de frecuencias, por lo tanto, se crean dos funciones, en las cuales se introducirá la matriz de frecuencia y la matriz de las diez amplitudes mayores. De las funciones obtendremos un vector con el número de repeticiones de las frecuencias y otro con las frecuencias que más se repiten.

Debemos añadir que cada frecuencia repetida esta redondeada, para no generar gráficas con decimales; además cada patrón de análisis de frecuencia (*ilustraciones 47 y 48*), tendrá los datos correspondientes al eje y recorrido realizado para su identificación.

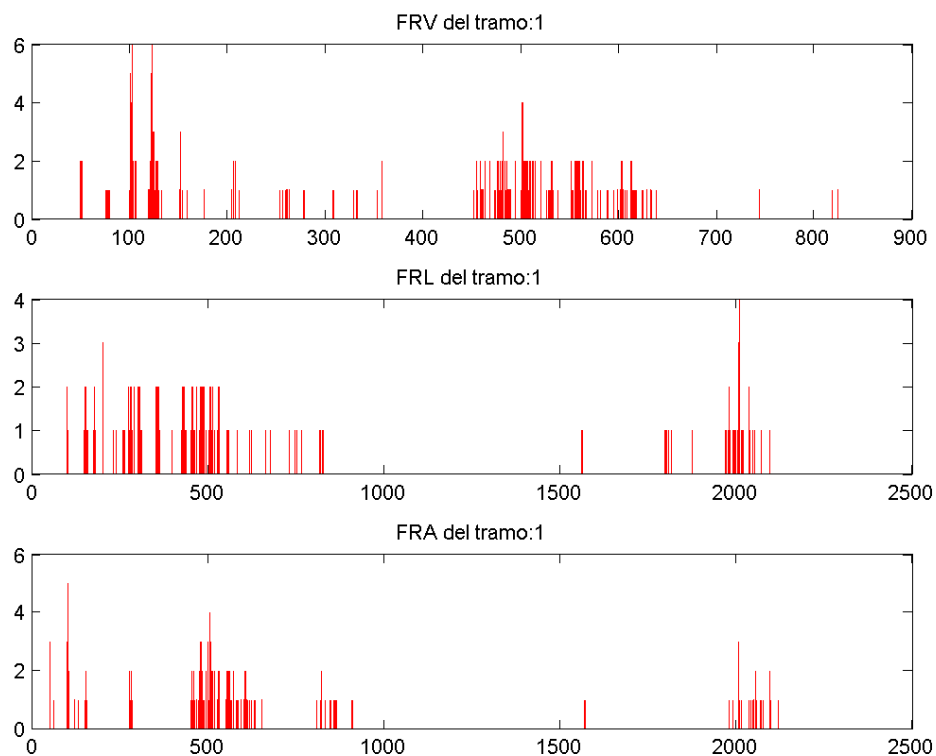


Ilustración 47-Patron de análisis de frecuencias del recorrido 1

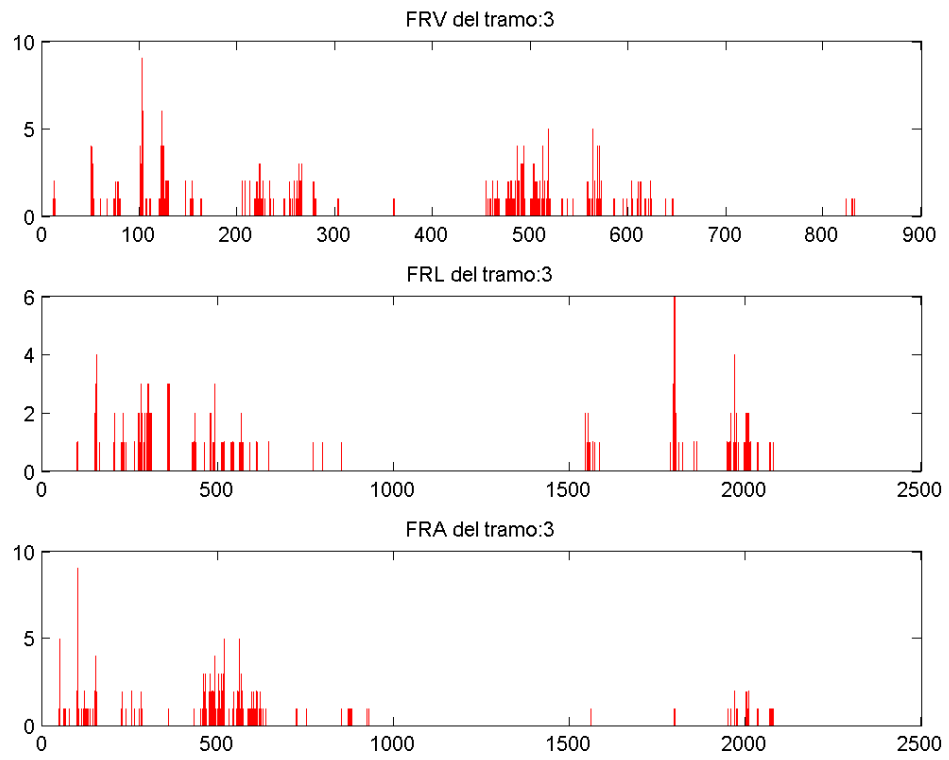


Ilustración 48-Patron de análisis de frecuencias del recorrido 3

RESULTADOS

Resultados:

En este apartado se desarrollará un examen minucioso de los patrones obtenidos por el software diseñado.

Terminada las comparativas de los patrones vibratorios, sabremos cuáles de ellos son más útiles y fiables al momento de un diagnóstico para su posterior implementación en programas de mantenimiento predictivo.

Análisis Temporal:

- **Patrones de Varianza**

Para la comparación de patrones de varianza se presentarán un total de 9 gráficas, estas se contrastarán en tres bloques de tres gráficas atendiendo a sus características de ejes y recorridos.

1. Eje: Longitudinal -----Recorridos:1,2 y 3

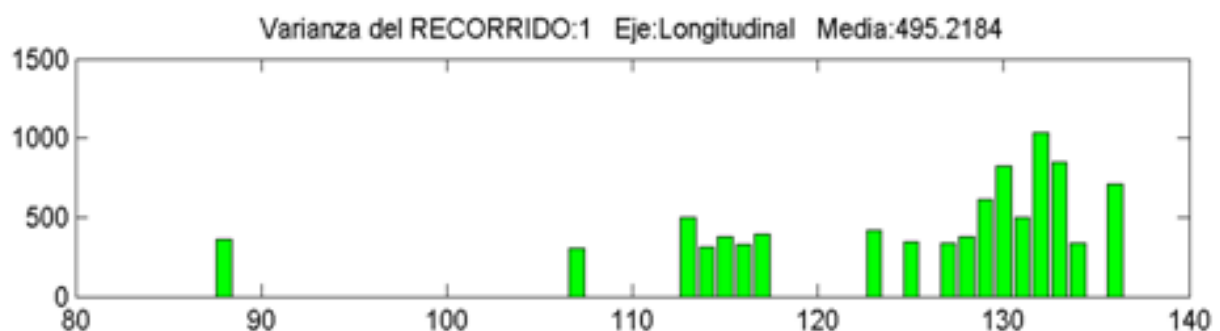


Ilustración 49-Patrón de varianza en eje longitudinal del recorrido 1

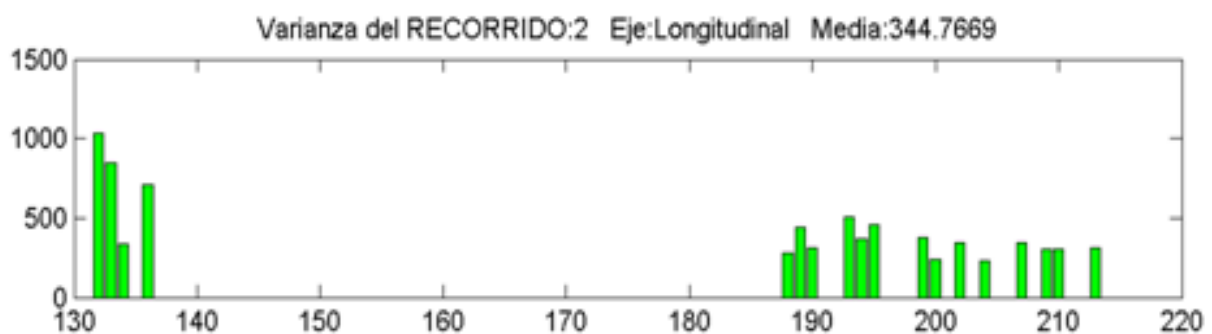


Ilustración 50-Patrón de varianza en eje longitudinal del recorrido 2

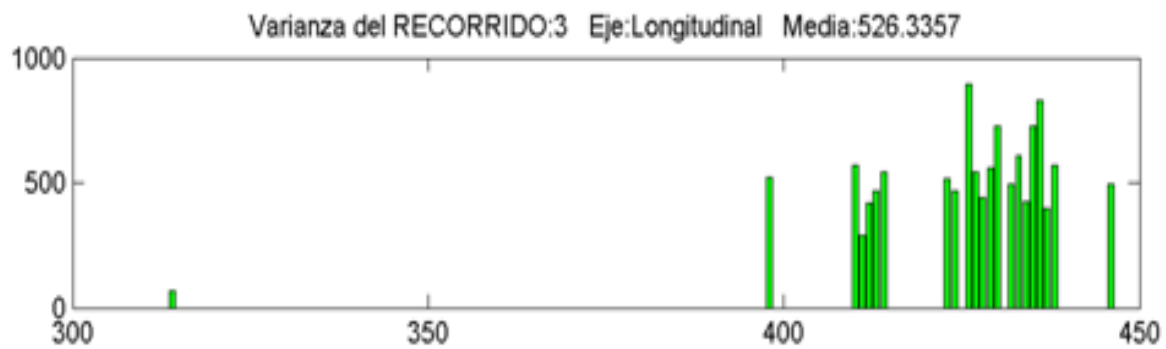


Ilustración 51-Patrón de varianza en eje longitudinal del recorrido 3

Analizando visualmente las imágenes (*ilustraciones 49,50 y 51*) nos podemos dar cuenta que la varianza entre los recorridos sus gráficos no tienen ningún parecido, ya que solapando señales no muestran similitudes.

En el ámbito matemático, se obtuvo la media de cada una de las varianzas de los recorridos dando las siguientes:

- Recorrido "1" → Media = 495.2184 → redondeando (495.2184) = 500
- Recorrido "2" → Media = 344.7669 → redondeando (344.7669) = 300
- Recorrido "3" → Media = 526.3357 → redondeando (526.3357) = 500

Al recurrir de un redondeo vemos que los parámetros de recorrido "1" y el "3" son muy similares y cercanos, pero comparados al recorrido "2" se ve una disminución.

La diferencia entre medias de los recorridos "1" y "3" respecto al "2" se puede explicar como un problema de trayectorias, es decir, como se explicó en el apartado de metodología-toma de datos, los transductores se posicionaron a un lado del bastidor del bogie haciendo un total de 6 transductores utilizados por dirección a examinar.

Pero debido a la gran cantidad de datos solo analizaríamos un lado del bastidor del bogie, por lo cual me lleva a explicar esta diferencia como un problema en el trayecto del AVE, ya que "1" y "3" son recorridos que tienen el mismo destino y final; mientras que en el "2" es su viceversa, generando esta diferencia.

2. Eje: Axial-----Recorridos:"1","2"y"3"

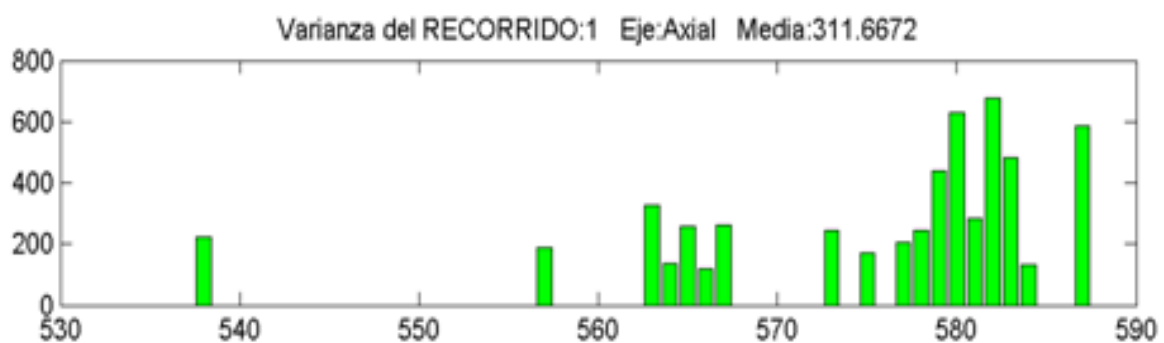


Ilustración 52-Patrón de varianza en eje axial del recorrido 1

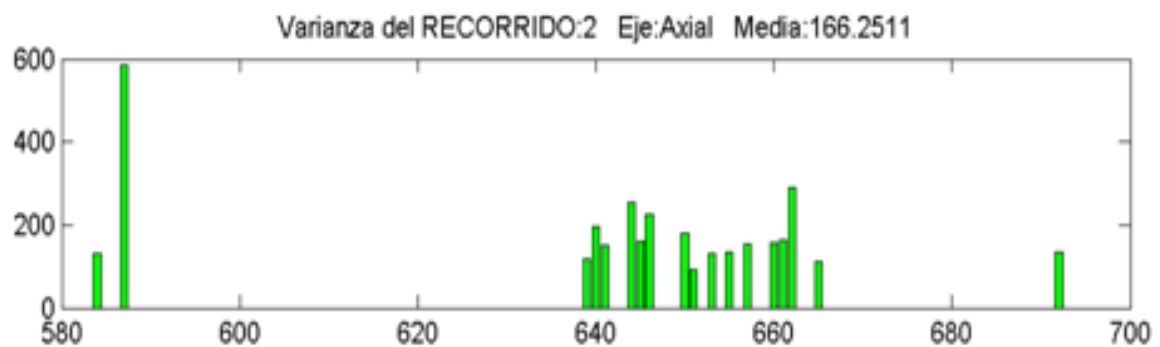


Ilustración 53-Patrón de varianza en eje axial del recorrido 2

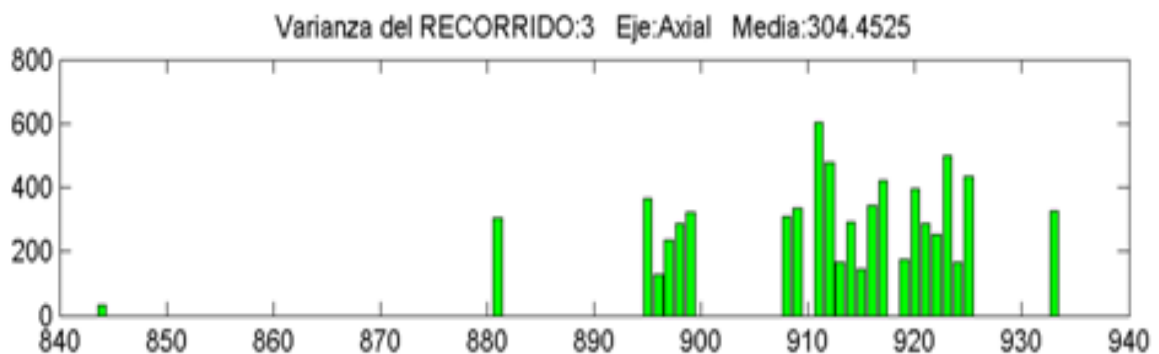


Ilustración 54-Patrón de varianza en eje axial del recorrido 3

En comparación con los gráficos (*ilustraciones 52, 53 y 54*) del eje longitudinal aquí podemos observar una similitud grafica entre los recorridos "1" y "3", y respecto con el recorrido "2 " difieren completamente.

En el ámbito matemático, se obtuvo la media de cada una de las varianzas de los recorridos dando las siguientes:

- Recorrido "1" → Media = 311.6672 → redondeando (311.6672) = 300
- Recorrido "2" → Media = 166.2511 → redondeando(166.2511) = 200
- Recorrido "3" → Media = 304.4525 → redondeando (304.4525) = 300

Como en la comparación anterior se puede observar una similitud de los recorridos "1" y "3" , pero estos difieren con el recorrido "2" debido a los trayectos que siguen.

3. Eje: Vertical ----- Recorridos:"1","2" y "3"

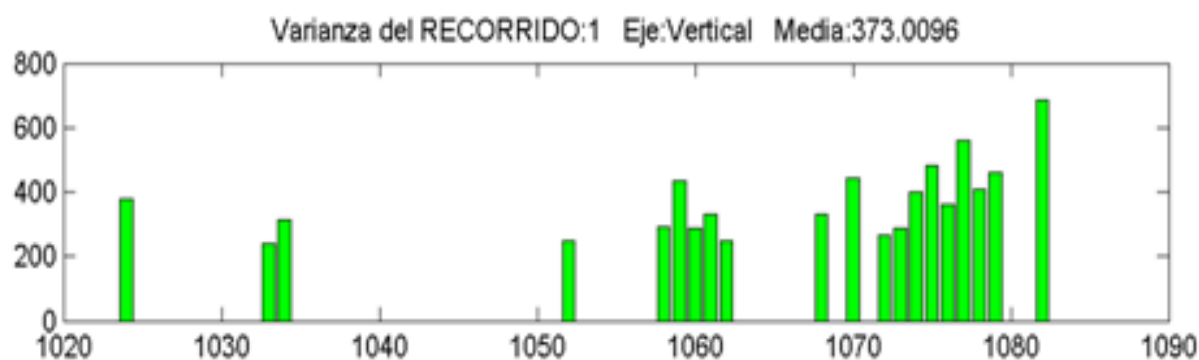


Ilustración 55-Patrón de varianza en eje vertical del recorrido 1

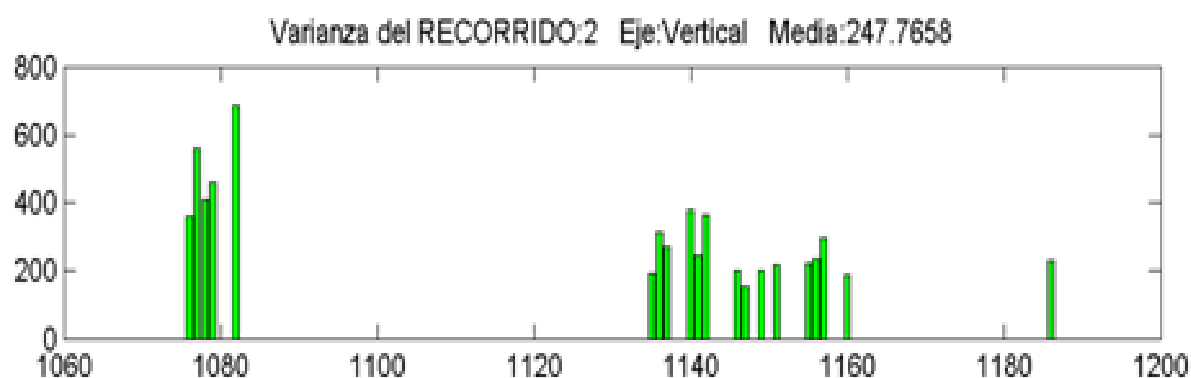


Ilustración 56-Patrón de varianza en eje vertical del recorrido 2

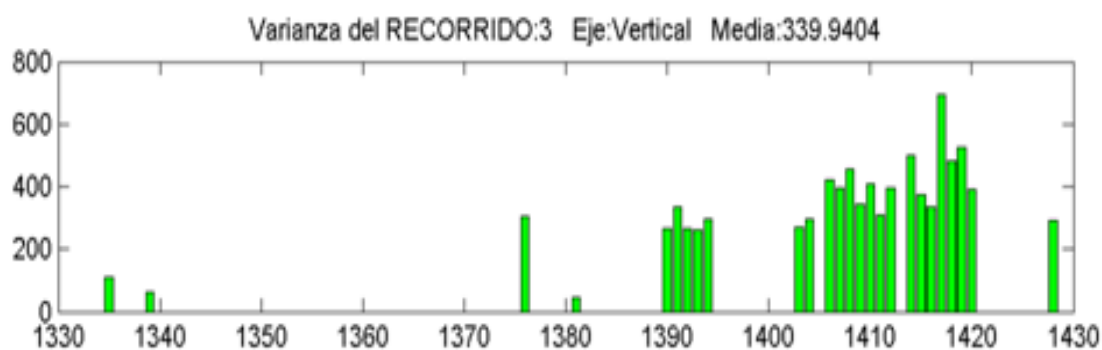


Ilustración 57-Patrón de varianza en eje vertical del recorrido 3

Desde el punto de vista grafico (*ilustraciones 55, 56 y 57*), observamos una similitud grafica entre el recorrido "1" y "3", pero respecto al recorrido "2" no guardan semejanza.

En el ámbito matemático, se obtuvo la media de cada una de las varianzas de los recorridos dando las siguientes:

- Recorrido "1" → Media = 373.0096 → redondeando (373.0096) = 400
- Recorrido "2" → Media = 247.7658 → redondeando (247.7658) = 200
- Recorrido "3" → Media = 339.9404 → redondeando (339.9404) = 300

En este caso al realizar el redondeo se manifiestan diferencias entre todos los recorridos, pero si observamos los números originales, tienen una gran semejanza entre los recorridos "1" y "3", y difieren con el recorrido "2", y es debido a las trayectorias que siguen cada uno.

- **Patrones de RMS (media cuadrática)**

Para la comparación de patrones de RMS se presentarán un total de 9 gráficas, estas se contrastarán en tres bloques de tres gráficas atendiendo a sus características de ejes y recorridos.

1. Eje: Longitudinal ----- Recorridos:"1","2" y "3"

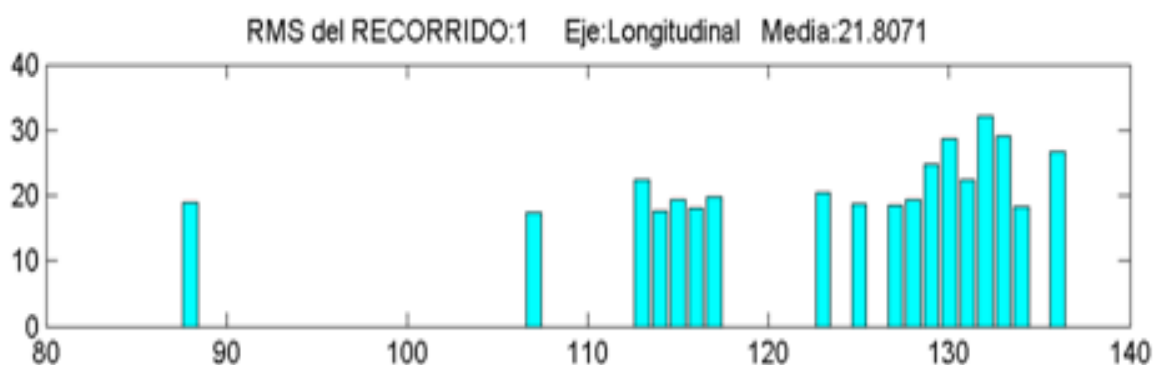


Ilustración 58-Patrón de RMS en el eje longitudinal del recorrido 1

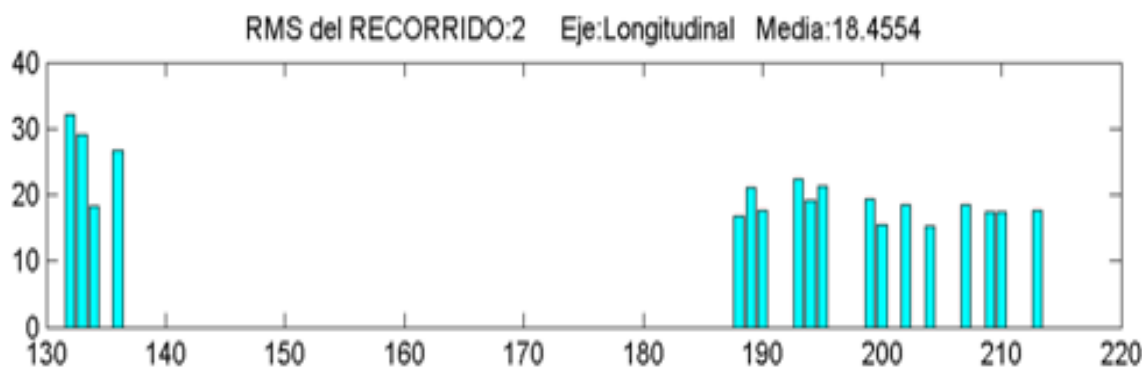


Ilustración 59-Patrón de RMS en el eje longitudinal del recorrido 2

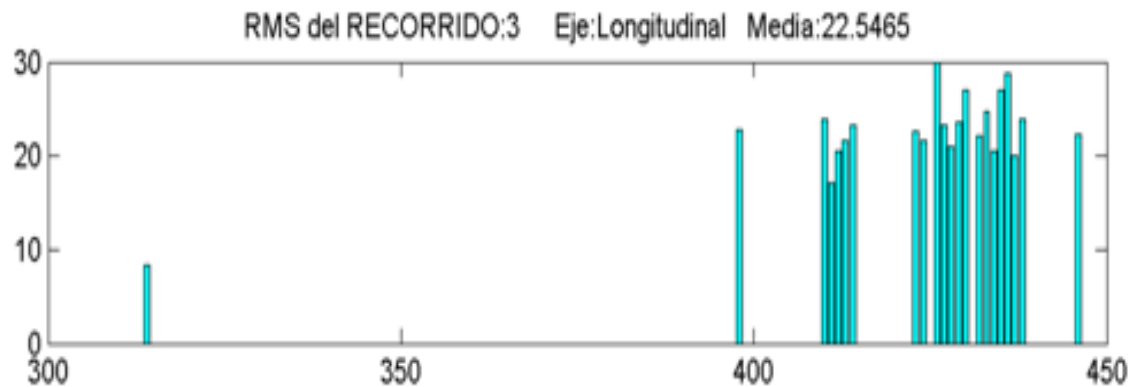


Ilustración 60--Patrón de RMS en el eje longitudinal del recorrido 3

Visualmente se observa que las gráficas (*ilustraciones 58, 59 y 60*) de los recorridos "1" y "3" guardan similitudes entre ellas, mientras que la gráfica del recorrido "2" guarda una cierta similitud gráficamente por parte de su lado derecho, pero la acumulación de las 4 barras hacen que no sea similar a las demás.

Matemáticamente se ha realizado las medias de cada RMS en los distintos recorridos:

- Recorrido "1" → Media = 21.8071 → redondeando (21.8071) = 20
- Recorrido "2" → Media = 18.4554 → redondeando (18.4554) = 20
- Recorrido "3" → Media = 22.5465 → redondeando (22.5465) = 20

En este caso visualizamos que respecto al redondeo guardan todos los recorridos semejanza, pero viendo los datos originales se puede apreciar más estrecha relación entre los recorridos "1" y "3", esto se debe a lo mencionado de sus trayectos de inicio y final, mientras que en el "2" se nota una ligera variación.

2. Eje: Axial ----- Recorridos: "1", "2" y "3"

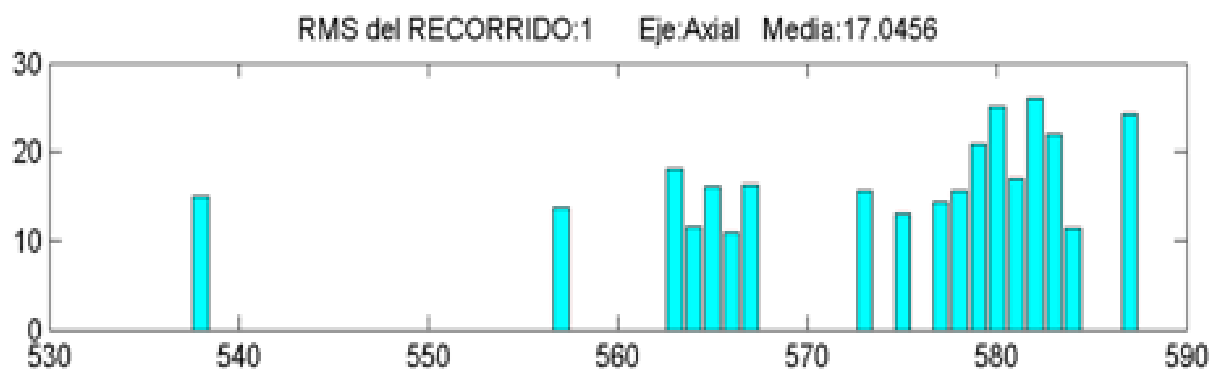


Ilustración 61-Patrón de RMS en el eje axial del recorrido 1

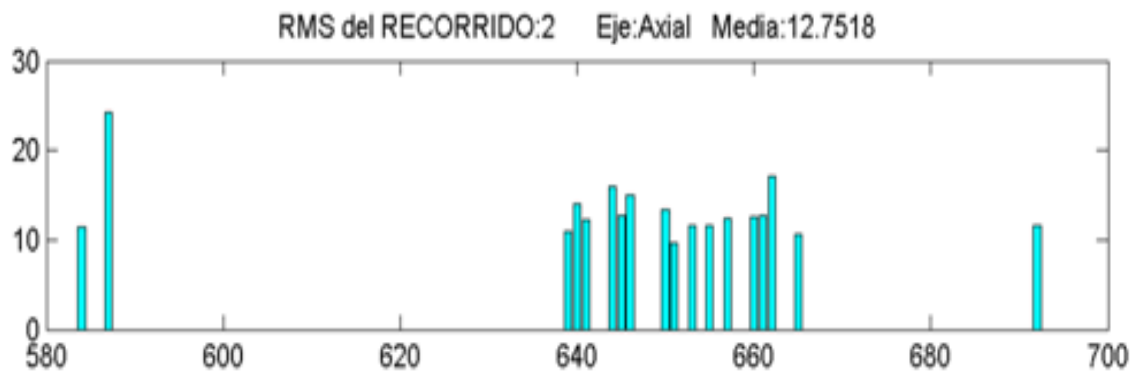


Ilustración 62--Patrón de RMS en el eje axial del recorrido 2

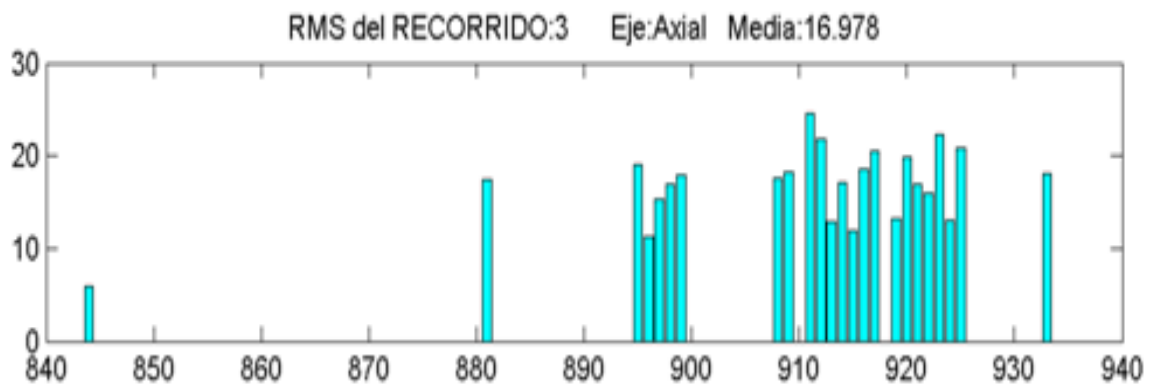


Ilustración 63--Patrón de RMS en el eje axial del recorrido 3

En este caso visualmente en los gráficos (*ilustraciones 61, 62 y 63*), los recorridos "1" y "3" son totalmente semejantes, mientras que el recorrido "2" es diferente a ellos.

En el ámbito matemático, se analizarán sus medias:

- Recorrido "1" → Media = 17.0456 → redondeando (17.0456) = 20
- Recorrido "2" → Media = 12.7518 → redondeando (12.7518) = 10
- Recorrido "3" → Media = 16.978 → redondeando (16.978) = 20

En este caso a diferencia de los recorridos en el eje longitudinal, se observa que después del redondeo solo los recorridos "1" y "3" guardan similitud. Mientras que el recorrido "2" no concuerda con su media del "1" y "3" coincidiendo con la comparativa visual.

Esta diferencia es debida a que el inicio y final del recorrido es invertido a los del recorrido "1" y "3", lo mismo mencionado en el caso anterior.

3. Eje: Vertical ----- Recorridos: "1", "2" y "3"

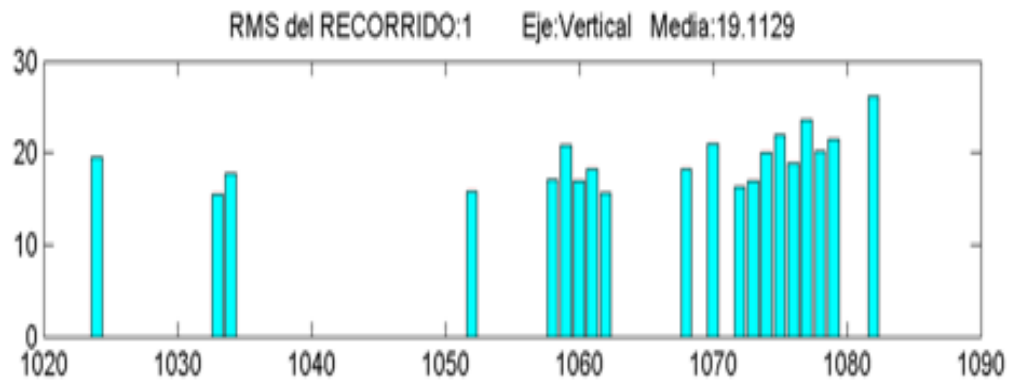


Ilustración 64--Patrón de RMS en el eje vertical del recorrido 1

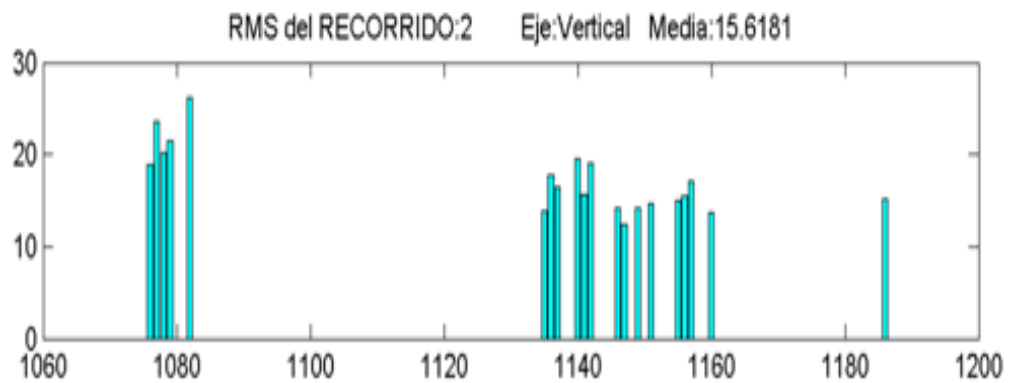


Ilustración 65--Patrón de RMS en el eje vertical del recorrido 2

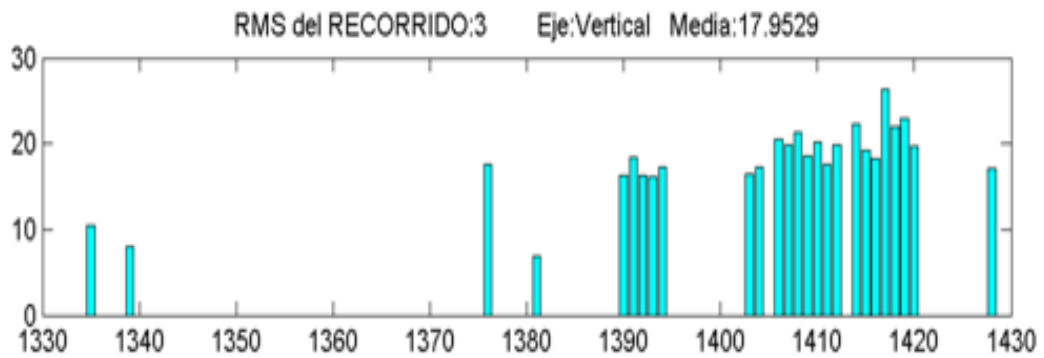


Ilustración 66--Patrón de RMS en el eje vertical del recorrido 3

En el caso análisis visual (*ilustraciones 64, 65 y 66*), las similitudes del recorrido "1" y "3" son semejantes, mientras que comparándolos con el "2" la diferencia se ve a simple vista.

Analizando las medias en este eje:

- Recorrido "1" → Media = 19.1129 → redondeando (19.1129) = 20
- Recorrido "2" → Media = 15.6181 → redondeando (15.6181) = 20
- Recorrido "3" → Media = 17.9529 → redondeando (17.9529) = 20

Realizando el redondeo se definiría como semejantes los recorridos, pero viendo sus valores iniciales, los recorridos "1" y "3" mantienen sus valores muy estrechamente, pero comparado con el recorrido "2" sus variaciones son mayores.

Esto debido a lo mencionado en los apartados anteriores.

• Patrones de Curtosis

Para la comparación de patrones de Curtosis se presentarán un total de 9 gráficas, estas se contrastarán en tres bloques de tres gráficas atendiendo a sus características de ejes y recorridos.

1. Eje: Longitudinal ----- Recorridos: "1", "2" y "3"

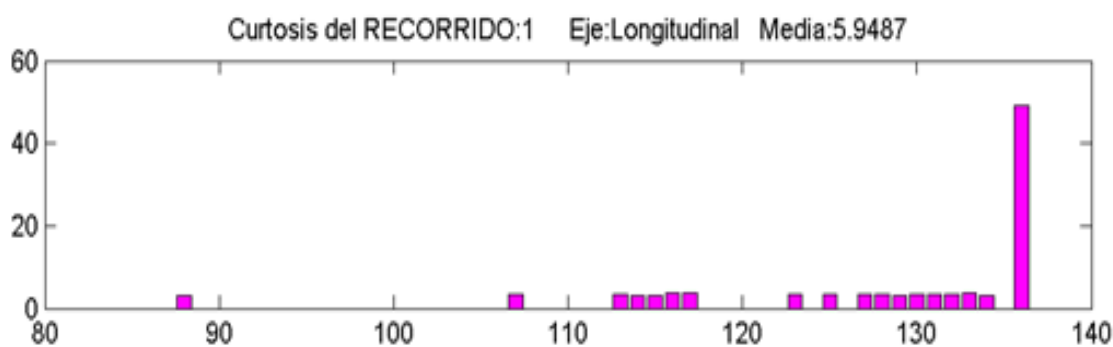


Ilustración 67--Patrón de Curtosis en el eje longitudinal del recorrido 1

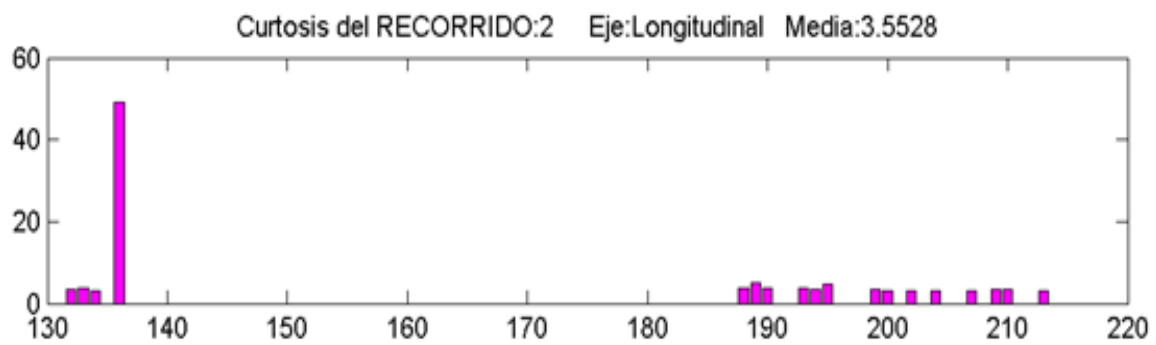


Ilustración 68-Patrón de Curtosis en el eje longitudinal del recorrido 2

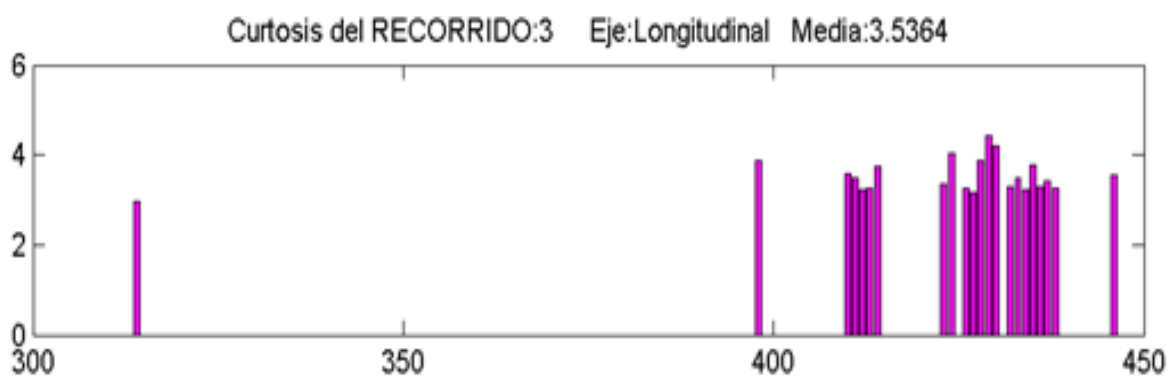


Ilustración 69-Patrón de Curtosis en el eje longitudinal del recorrido 3

En un principio el análisis visual (*ilustraciones 67, 68 y 69*) no nos aporta ningún dato ya que las gráficas difieren en su totalidad, ninguna es semejante.

Respecto a la parte matemática las medias son:

- Recorrido "1" → Media = 5.9487 → redondeando(5.9487) = 6
- Recorrido "2" → Media = 3.35528 → redondeando(3.35528) = 4
- Recorrido "3" → Media = 3.5364 → redondeando(3.5364) = 4

En este caso la semejanza matemática se da a través de los recorridos "2" y "3", mientras que en el recorrido "1" su alejamiento de los demás respecto a su media es de 2 unidades.

Esto difiere completamente a lo visto en los casos de varianza y de RMS que siempre guardaban relaciones los recorridos "1" y "3".

Por lo tanto, podemos mencionar que el inicio y final del trayecto no influye en la curtosis, mientras que el recorrido "1", sus valores se acercan a la media; siendo una del tipo leptocúrtica y la más apuntalada de las otras.

2. Eje: Axial ----- Recorridos: "1", "2" y "3"

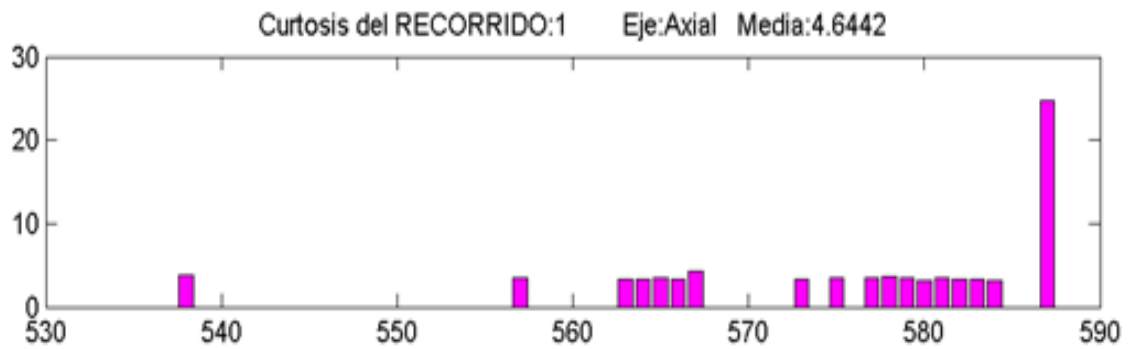


Ilustración 70-Patrón de Curtosis en el eje axial del recorrido 1

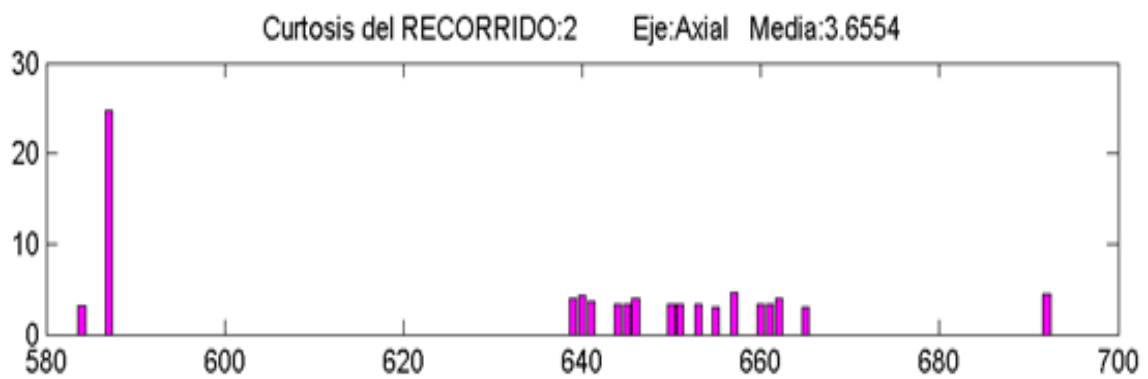


Ilustración 71-Patrón de Curtosis en el eje axial del recorrido 2

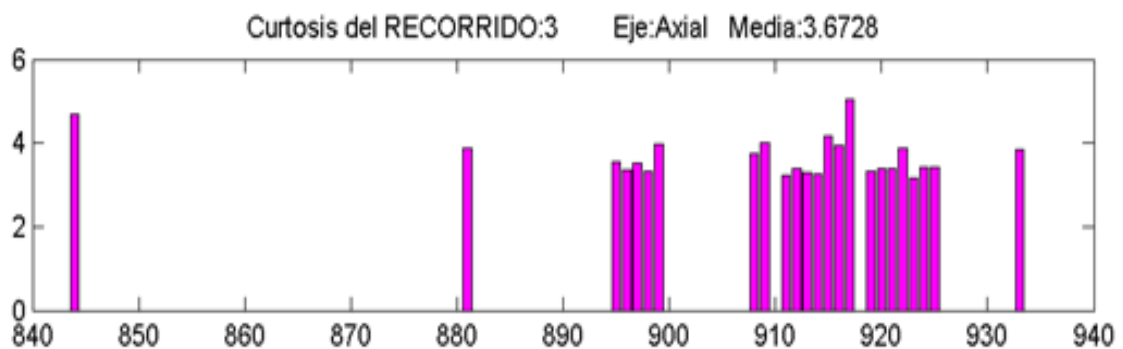


Ilustración 72-Patrón de Curtosis en el eje axial del recorrido 3

Como lo concluido anteriormente, visualmente (*ilustraciones 70, 71 y 72*) no guardan semejanzas y no se puede obtener otro dato visual.

En el caso matemático, las medias obtenidas son:

- Recorrido "1" → Media = 4.6442 → redondeando (4.6442) = 5
- Recorrido "2" → Media = 3.6554 → redondeando (3.5528) = 4
- Recorrido "3" → Media = 3.6554 → redondeando (3.5364) = 4

En este caso la curtosis del recorrido "1" no tiene mucha diferencia con respecto a sus medias, puede sacar en un primer pensamiento que las direcciones de medida son factores muy importantes en los patrones de curtosis.

3. Eje: Vertical ----- Recorridos: "1", "2" y "3"

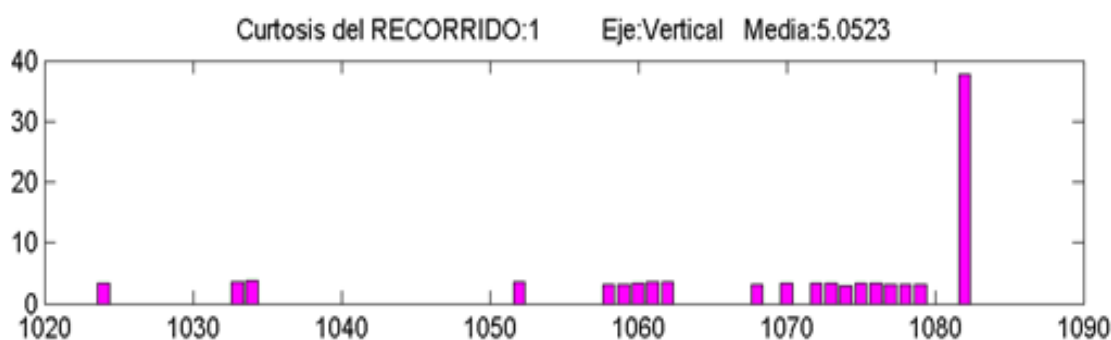


Ilustración 73-Patrón de Curtosis en el eje vertical del recorrido 1

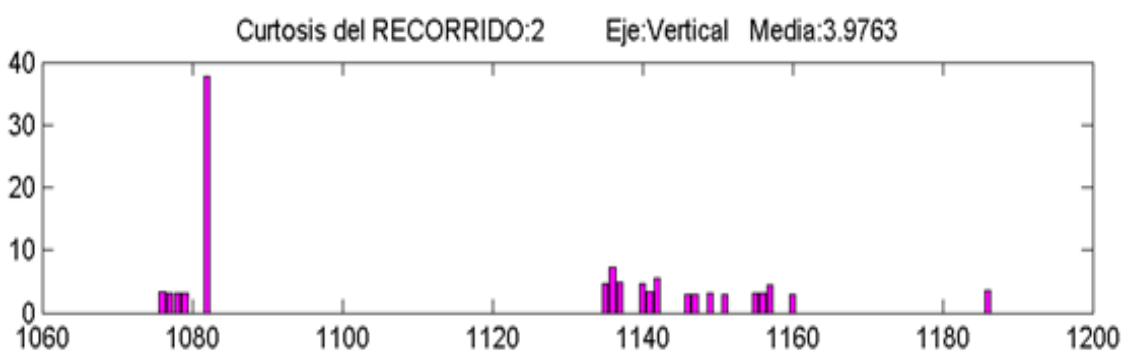


Ilustración 74-Patrón de Curtosis en el eje vertical del recorrido 2

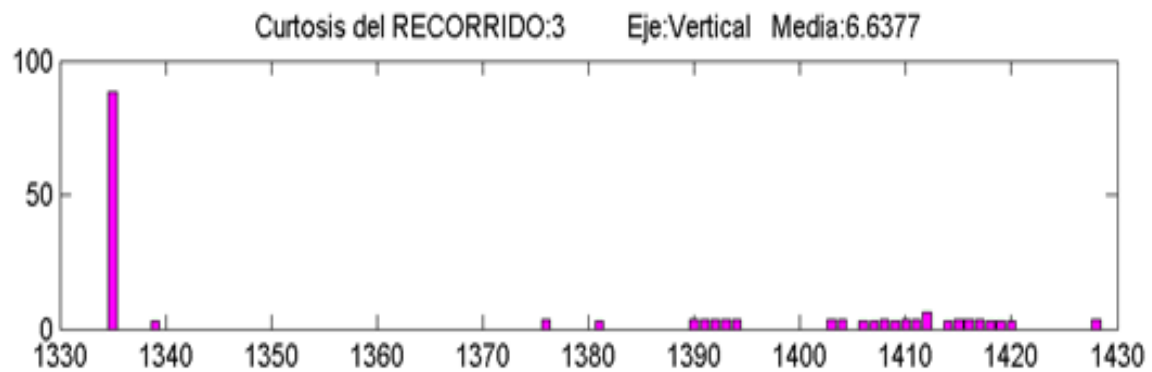


Ilustración 75-Patrón de Curtosis en el eje vertical del recorrido 3

En este caso visualmente (*ilustraciones 73, 74 y 75*) puedo mencionar que tienen similitudes entre las gráficas de los recorridos "2" y "3".

Matemáticamente, las medias obtenidas son:

- Recorrido "1" → Media = 5.0523 → redondeando (5.0523) = 5
- Recorrido "2" → Media = 3.9763 → redondeando (3.9763) = 4
- Recorrido "3" → Media = 6.6377 → redondeando (6.6377) = 7

En este caso observamos que no hay ni un solo recorrido que su media coincida haciendo al recorrido "3" la más leptocúrtica de todas.

Respecto a lo comentado vemos que la dirección a estudiar repercute en el caso de la curtosis, ya que en este las curtosis media es distinta entre todos.

Análisis de Frecuencia

En este apartado nos valdremos del uso de los espectros de frecuencias obtenidos a partir de la FFT (Transformada Rápida de Fourier).

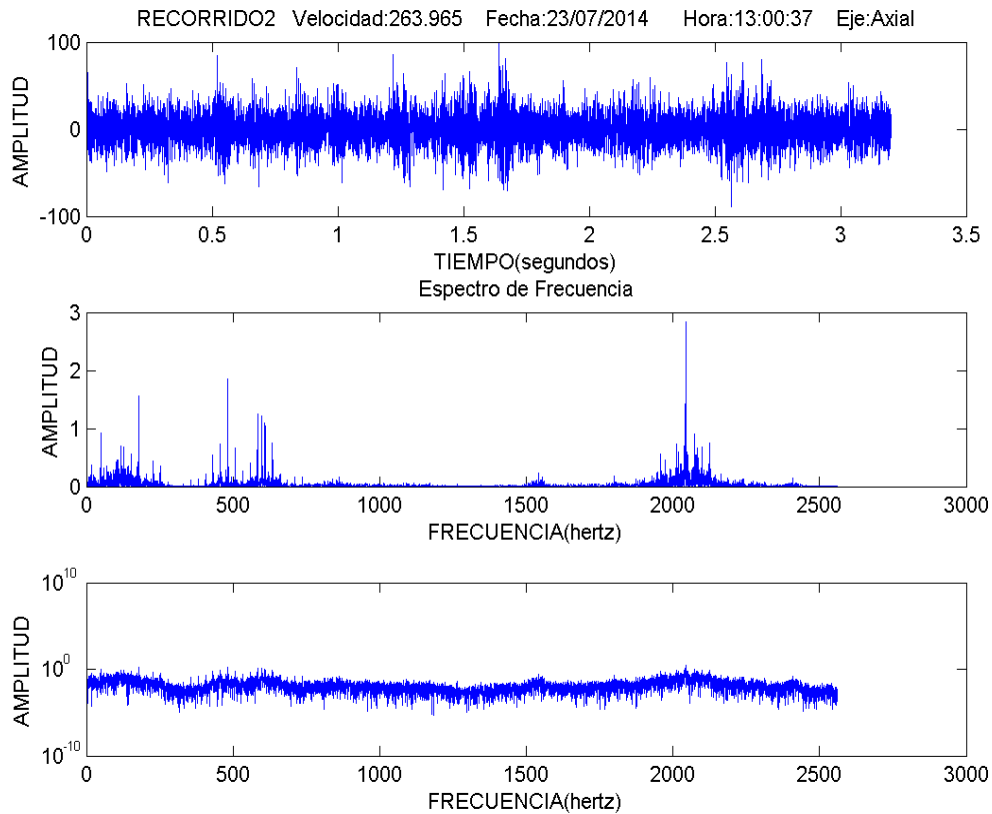


Ilustración 76-Representacion del oscilograma y espectrograma

Para este análisis haremos uso de las amplitudes más repetidas de cada señal y representándola según la dirección en las que fueron tomadas.

En este apartado tendremos el estudio de un total de 9 graficas, divididos en tres bloques de tres y separando según el eje y recorridos.

- Patrones de frecuencias repetidas en el eje Longitudinal

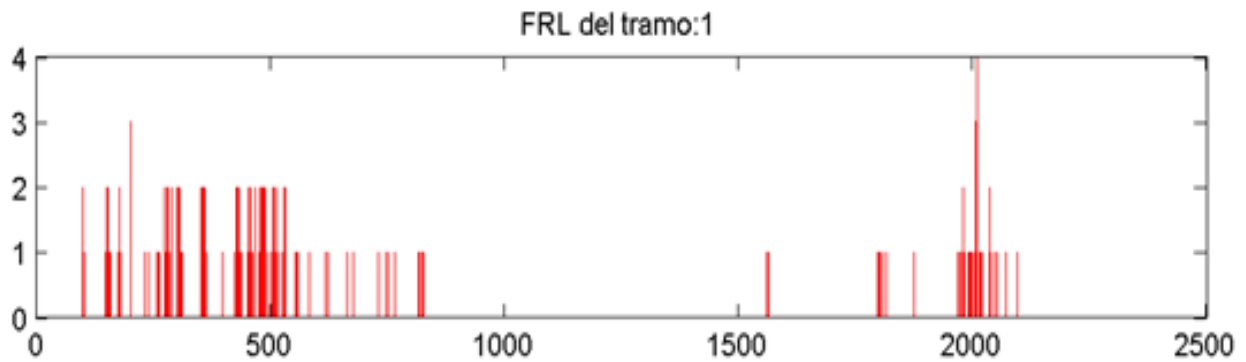


Ilustración 77-Patrón de frecuencia repetida eje longitudinal recorrido 1

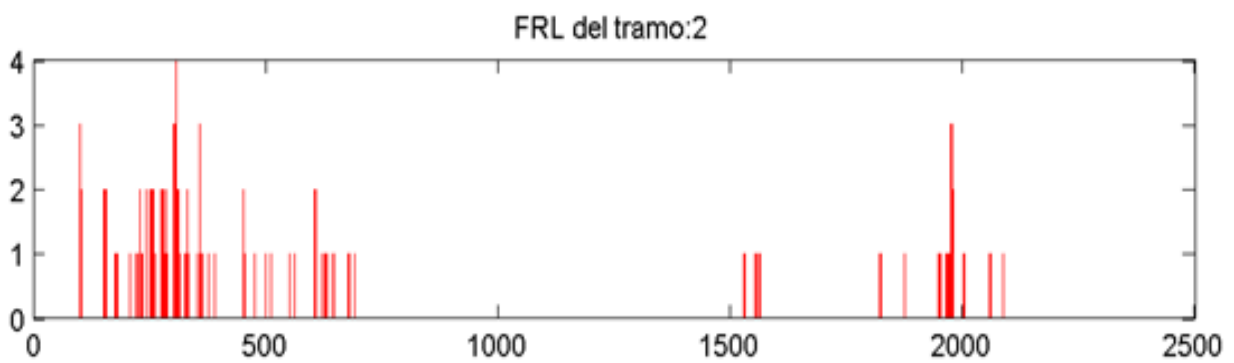


Ilustración 78- Patrón de frecuencia repetida eje longitudinal recorrido 2

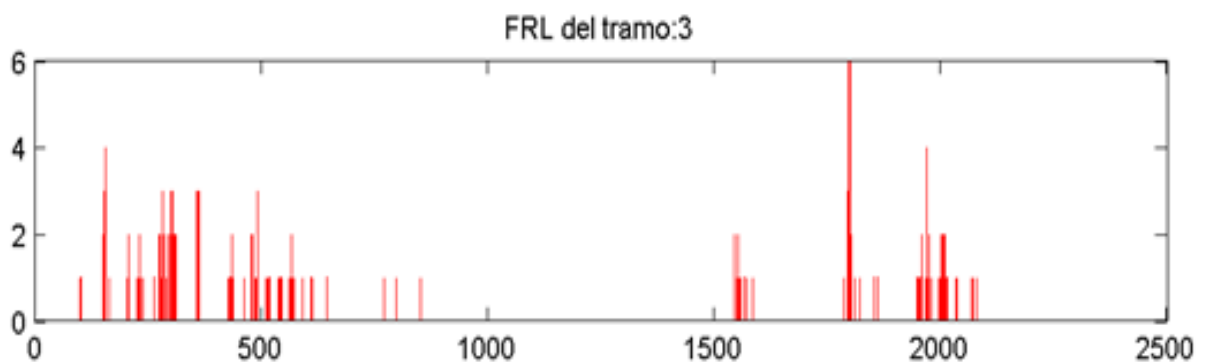


Ilustración 79-Patrón de frecuencia repetida eje longitudinal recorrido 3

En el caso de un análisis visual (*ilustraciones 77, 78 y 79*), podemos decir sin dudas que las imágenes son semejantes casi en su totalidad, debido a la ubicación de cada elemento que constituye el diagrama de barras es coincidente en los gráficos

También podemos expresar unas pequeñas variaciones como:

- En frecuencias de 1800 Hz, las repeticiones son mayores en el recorrido 3 (6 repeticiones), mientras que en los tramos es de 1 repetición.
- En frecuencias de 250, las repeticiones son menores en el recorrido 1 que los otros tramos.
- En frecuencias de 2000 Hz, las repeticiones de recorrido 2 son menores respecto al de los otros 2 recorridos.

- **Patrones de amplitudes repetidas en el eje Axial**

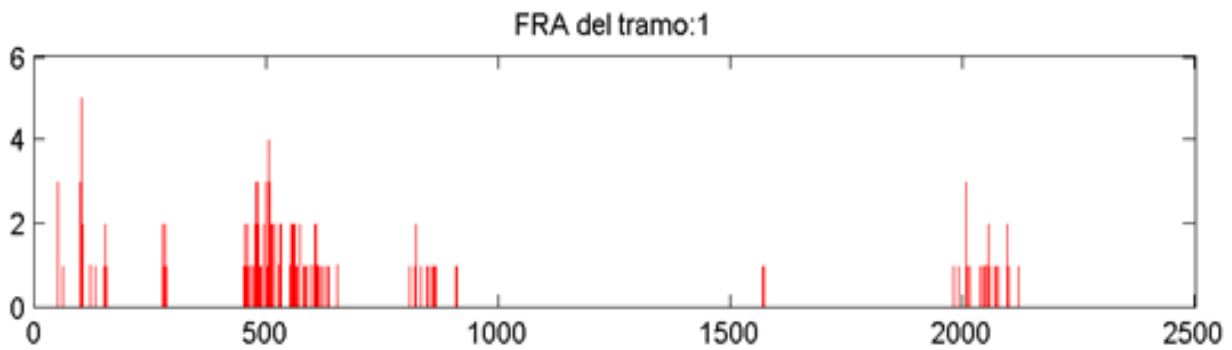


Ilustración 80- Patrón de frecuencias repetidas eje axial recorrido 1

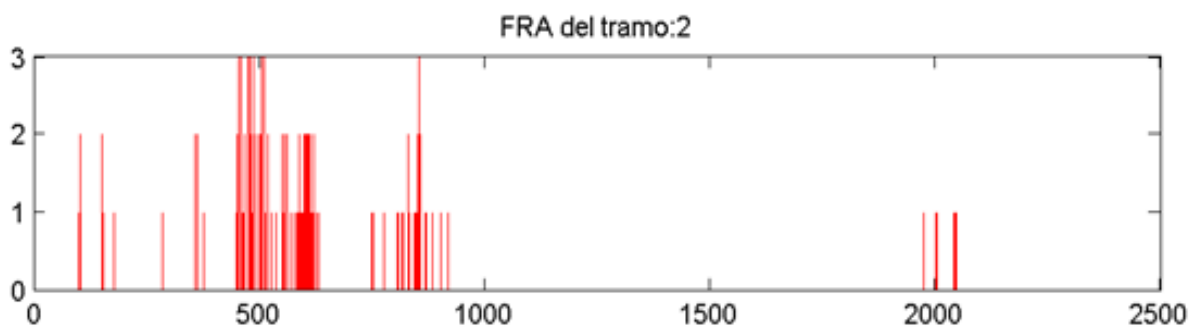


Ilustración 81- Patrón de frecuencias repetidas eje axial recorrido 2

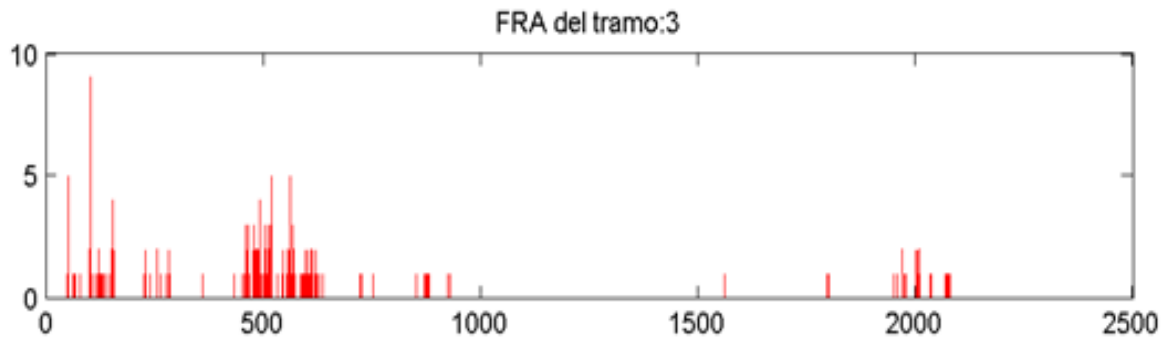


Ilustración 82- Patrón de frecuencias repetidas eje axial recorrido 3

Visualmente vemos que las gráficas (*ilustraciones 80, 81 y 82*) que guardan una similitud entre ellas son las del recorrido "1", "2" y "3".

También podemos expresar unas pequeñas variaciones como:

- En la frecuencia de 2000 Hz, los recorridos "1" y "3" expresan un gran número de repeticiones comparado con el recorrido "2".
- En la frecuencia de 500 Hz, los recorridos guardan una diferencia entre ellos de 1 repetición, siendo el más llamativo el recorrido "3".
- En la frecuencia de 100 Hz, el recorrido "3" supera con gran cantidad de repeticiones a los demás recorridos.

- **Patrones de amplitudes repetidas en el eje Axial**

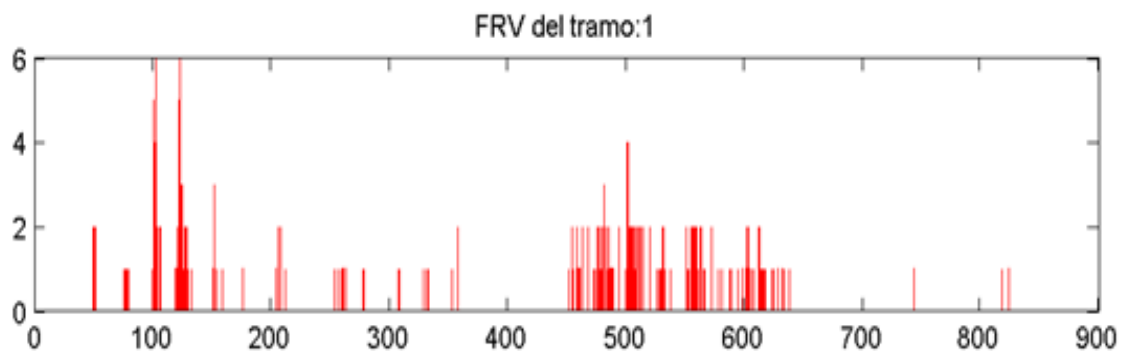


Ilustración 83- Patrón de frecuencias repetidas eje vertical recorrido 1

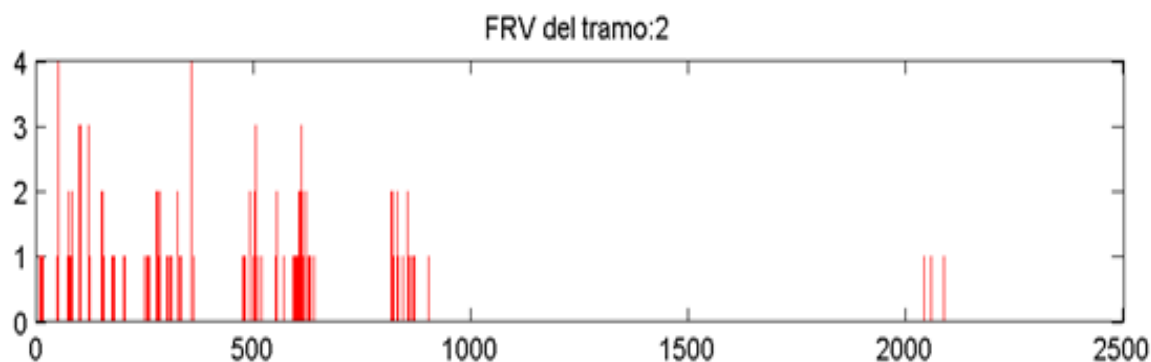


Ilustración 84- Patrón de frecuencias repetidas eje vertical recorrido 2

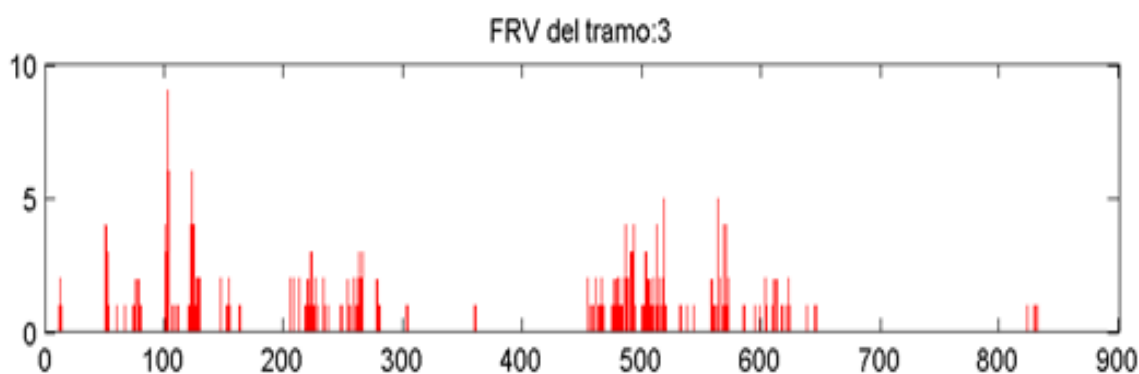


Ilustración 85- Patrón de frecuencias repetidas eje vertical recorrido 3

Visualmente vemos que las gráficas (*ilustraciones 83, 84 y 85*) que guardan una similitud entre ellas son las del recorrido "1" y "3" mientras que el recorrido "2" registramos frecuencias en valores de 2000 Hz.

Cabe destacar ciertas características entre las representaciones:

- En frecuencia de 100 Hz, las repeticiones de recorrido "3" y "1" superan con diferencia al recorrido "2".
- En frecuencias de 500 Hz, la repetición entre recorridos es idéntica.
- En frecuencia de 800 Hz, las repeticiones son equitativas entre las representaciones.
- Solo el recorrido "2" registra repeticiones en frecuencias de 2000 Hz siendo ante todo muy poco influenciada, debido a su bajo número de repeticiones.

OBJETIVOS Y TRABAJO FUTUROS

Conclusiones

Después de realizar la visualización de los distintos patrones otorgados por el programa diseñado, llegamos a las siguientes conclusiones:

- En relación a los objetivos planteados del estudio de señales vibratorias de un sistema mecánico, podemos decir que se cumplieron en su totalidad, ya que se pudo realizar tanto los análisis temporales como frecuenciales para obtener un archivo con todas las representaciones y patrones para su posterior estudio visual, según la metodología seguida y los códigos de programación.
- Respecto a los patrones de varianza, podemos decir que la media obtenida por los gráficos de barras es un método de demostración para la comparación de defectos, ya que en caso de un daño o deficiencia en el bogie las medias de los recorridos variarían, con lo que podremos identificar los problemas o fallos y hacer el debido mantenimiento.
- También tener en cuenta, que los gráficos obtenidos de varianza dependen mucho del trayecto en sí, es decir, no podemos hacer comparaciones de los patrones de una misma ruta si el inicio y final del trayecto no coinciden.
- Respecto a los patrones de RMS (media cuadrática), funcionan de igual manera que el de varianza, pero con la condición que cada recorrido también tenga un inicio y final semejante, ya que las medias solo coinciden con los recorridos "1" y "3", (esto debido a que el recorrido "2" es de Madrid- Sevilla y no Sevilla-Madrid como los demás).
- En lo que se refiere a los patrones de la curtosis, podemos decir que la diferencia de los gráficos con respecto a la media empeora según los ejes estudiados, siendo los más semejantes los longitudinales y axiales, mientras que en los verticales se difieren demasiado, por lo cual como método de patrón, no recomendaría su uso.
- Con relación al análisis frecuencial, el método de frecuencias repetidas nos da un punto de vista más interesante, ya que no solo nos permite identificar los posibles problemas dependiendo del número de repeticiones de cada una de las frecuencias, sino que nos muestra que zonas frecuenciales que son las compartidas con los otros ejes.

- Las frecuencias más influyen en los patrones son en las de 100-500 HZ y 1800-2000Hz.

Trabajos Futuros

También para agregar podemos mencionar algunos puntos de vistas que podrían ser medios que contribuyan a la evolución de proyecto:

- Análisis de las señales mediante otros métodos de medidas estadísticos como pueden ser las desviaciones típicas, coeficiente de variación, factores de crecimiento, etc; para así generar patrones que puedan tener más fiabilidad respecto a los utilizados.
- Al ser un programa automatizado generado para los recorridos dados en un solo día, podemos mejorarlo y que nos permita generarlo para los distintos días en los que se tomen los datos.
- El análisis no solo de las frecuencias repetidas en solo las 10 amplitudes con mayor valor sino un análisis con los distintos picos que encontremos en el espectrómetro.
- Agregar al programa los datos de carga y temperatura, para permitir ser más exactos en los cálculos; así mismo realizar un estudio no solo en un rango de velocidades sino en todas las velocidades para así detectar deficiencias con mayor exactitud y realizar los mantenimientos respectivos.

PRESUPUESTO

Presupuesto

En este apartado se comentará los gastos hechos para que se diera posible el desarrollo del análisis vibratorio de un dispositivo mecánico.

El presupuesto hallado nos permitirá saber cuál es el coste aproximado del proyecto, para los cuales se necesitó:

- **Licencias de software**

En este caso los softwares utilizados fueron el Microsoft Office Word 2013 (**149 €/licencia**) y el software matemático MATLAB R2013b (**2000 €/licencia**). Cada uno de ellos tendrá un tiempo de vida útil de 12 meses.

Cada uno de estos será utilizado entre 4 y 5 meses respectivamente.

$$coste = \frac{precio * tiempo\ utilizado}{vida\ útil}$$

- **Personal**

Respecto a este apartado, tendremos el apoyo de dos ingenieros titulados Higinio Rubio Alonso y Alejandro Bustos Caballero, y el ingeniero junior David Quispe Abregú.

Los ingenieros titulados tendrán un gasto de 80€/h y se realizó un aporte total de 15 horas.

El ingeniero junior será el encargado de la realización del software y la memoria los cual demuestra un gasto de 35€/h, con un aporte total de 200 horas.

$$coste = precio\ del\ ingeniero * horas\ contribuidas$$

- **Equipos empleados**

Los equipos utilizados durante el proyecto serán el ordenador y la impresora (**1200€**), los cuales tendrán una vida útil de 48 meses y un uso del mismo de 5 meses.

$$coste = \frac{precio * tiempo\ utilizado}{vida\ útil}$$

- **Resto**

En esta categoría incluimos los costes de material de oficina usado (papel, tinta, bolígrafos, abonos de viaje, etc).

Presupuesto del Proyecto	
Licencias de software:	
MATLAB R2013b	840 €
Microsoft Office Word 2013	49 €
Total:	889€
Personal:	
Ingenieros titulados	2400€
Ingeniero junior	7000€
Total:	9400€
Equipos empleados:	
Ordenador e Impresora	125€
Total:	125€
Material de oficina:	200€
Presupuesto total:	10614€

El gasto total del proyecto será de 10 614 €.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Páginas web

- <https://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo2/15/jsanrosa.pdf>, 07/11/2004
- <http://www.uhu.es/servicio.prevencion/menuservicio/info/higiene/vibraciones.pdf>, 01/02/2009
- <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/50.pdf>, 04/09/2000
- <http://guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>, 27/02/2013
- http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_predictivo.pdf, 31/05/2002
- <http://www.aaende.org.ar/sitio/material/corende2000raul.pdf>, 30/04/2014

Trabajos de fin de carrera

- **Clasificación y análisis de la evolución de la respuesta modal de un eje ferroviario con grietas**, Sergio Fernández Maite, universidad Carlos III de Madrid, Marzo 2013
- **Registro y análisis de la señal vibratoria de un eje ferroviario a escala para defectología**, Raúl Sánchez Barato, universidad Carlos III d Madrid, Octubre 2012
- **Estudio experimental de las vibraciones de un eje con defectos**, Bidatz Zalakain Astiazaran, universidad Carlos III de Madrid, 2013

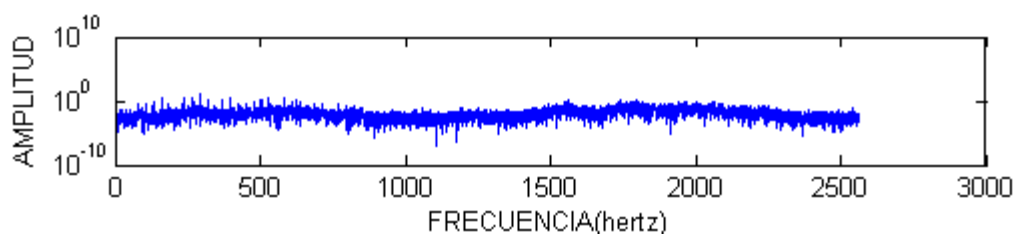
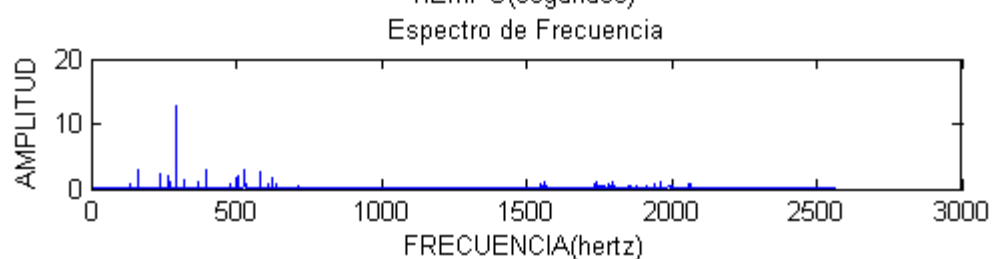
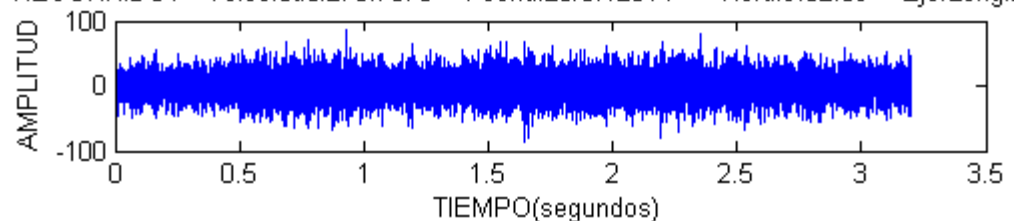
Libros

- **"Automóviles y ferrocarriles"**, Antonio Gauchía Babé, Daniel García-Pozuelo, Ramos, Beatriz López Boada, María Jesús López Boada, Ester Olmeda Santamaría, Vicente Díaz López; Julio Fuentes Losa, Universidad Nacional de Educación a distancia, 2014.
- Apuntes de Material Rodante del curso de "AUTOMOVILES Y FERROCARRILES", universidad Carlos III de Madrid, 2015.

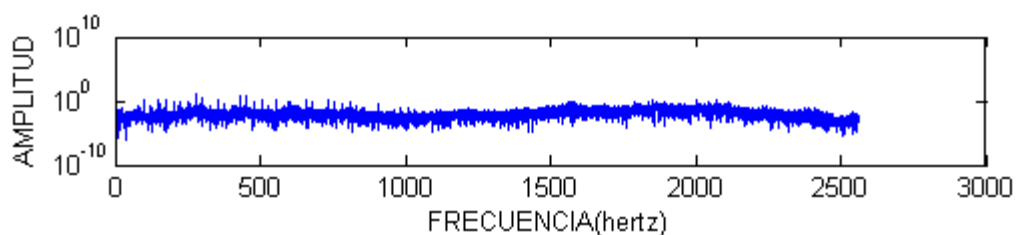
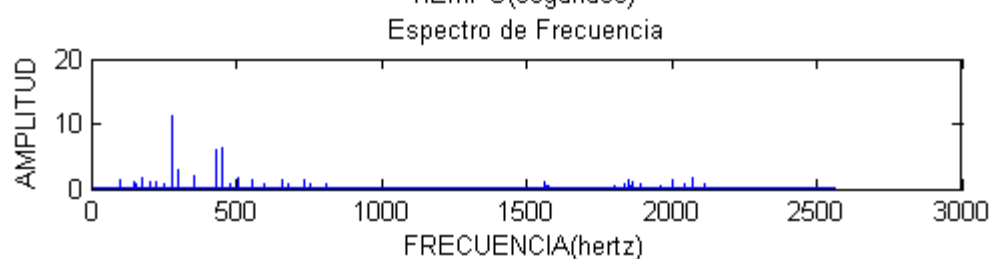
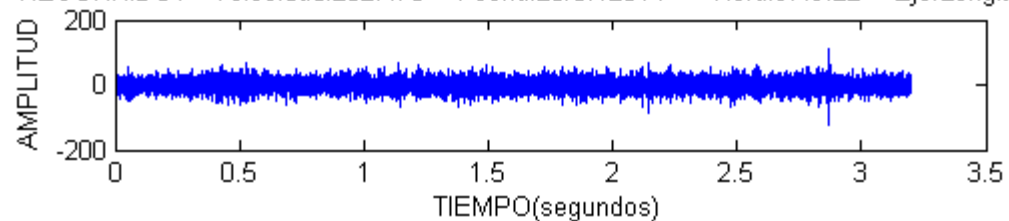
ANEXO

Analisis de Vibraciones en un bogie de tren

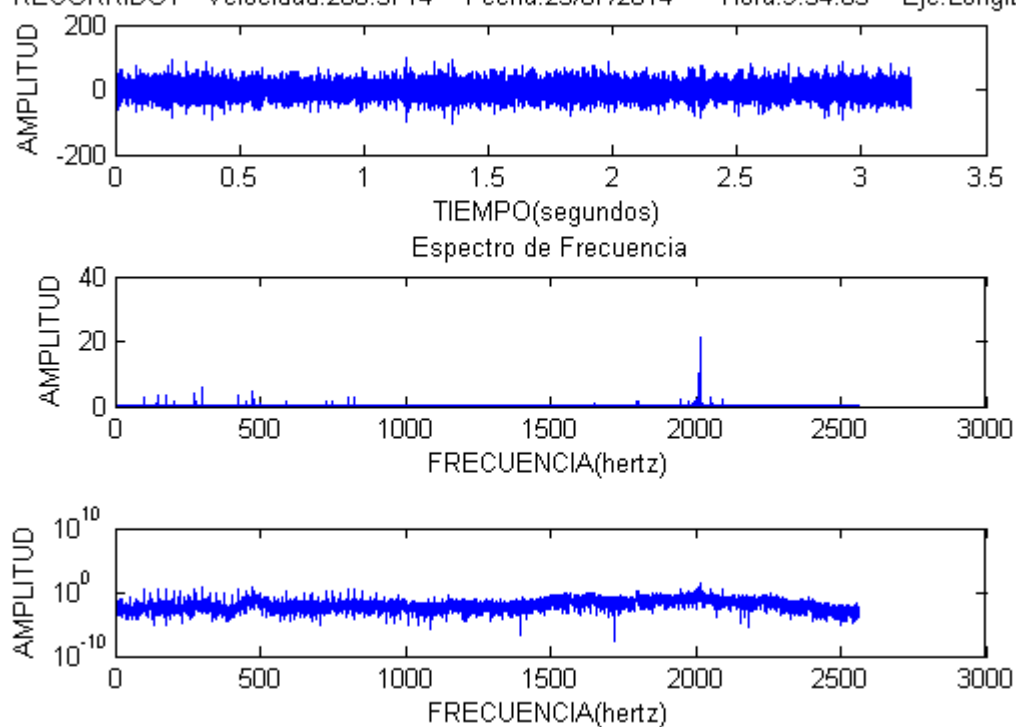
RECORRIDO1 Velocidad:275.7076 Fecha:23/07/2014 Hora:9:32:39 Eje:Longitudinal



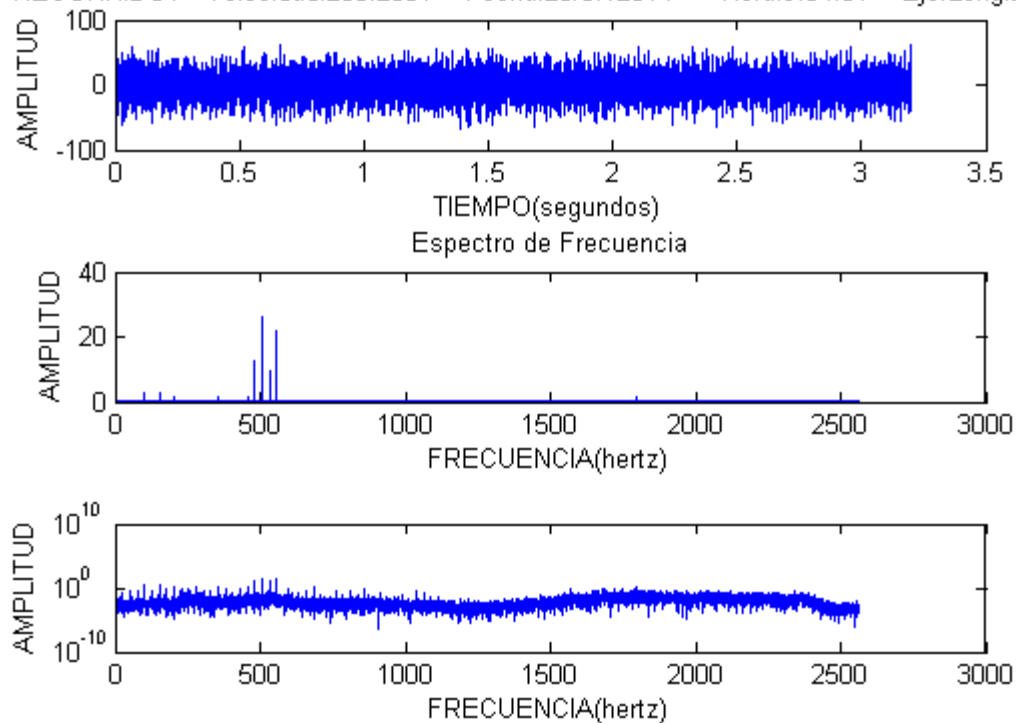
RECORRIDO1 Velocidad:262.475 Fecha:23/07/2014 Hora:9:49:22 Eje:Longitudinal



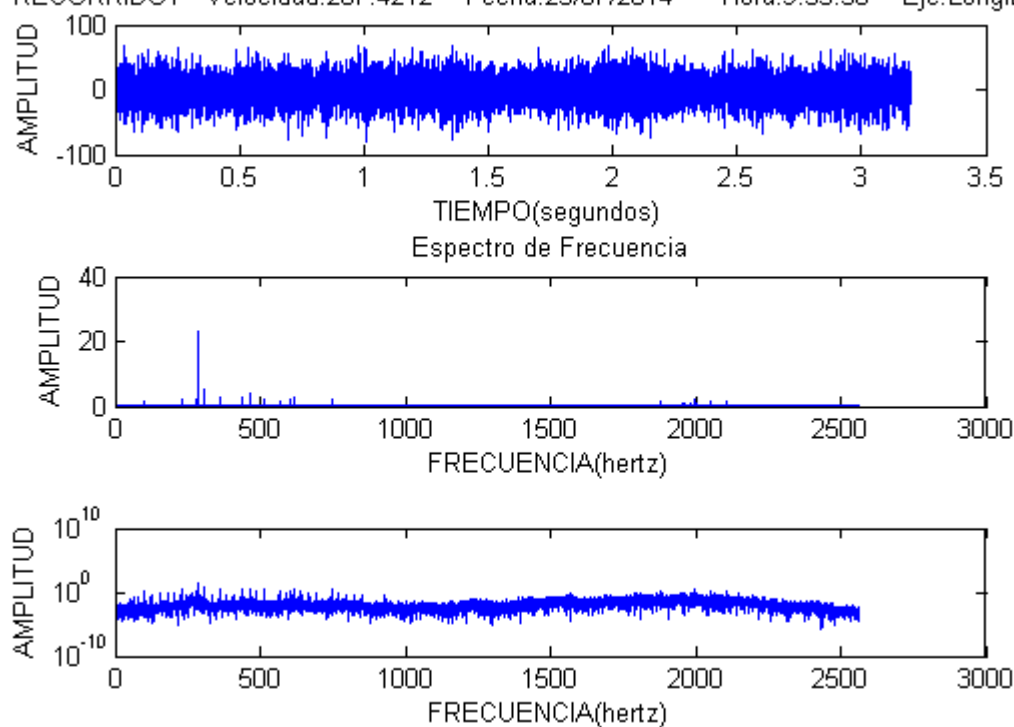
RECORRIDO1 Velocidad:260.3714 Fecha:23/07/2014 Hora:9:54:03 Eje:Longitudinal



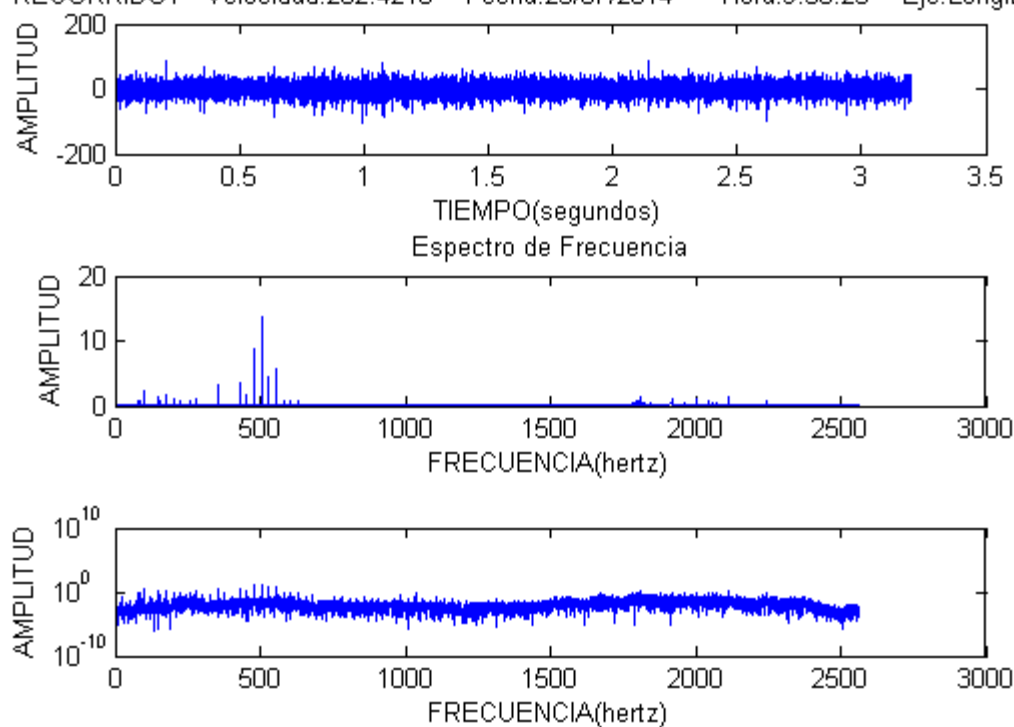
RECORRIDO1 Velocidad:263.2351 Fecha:23/07/2014 Hora:9:54:51 Eje:Longitudinal



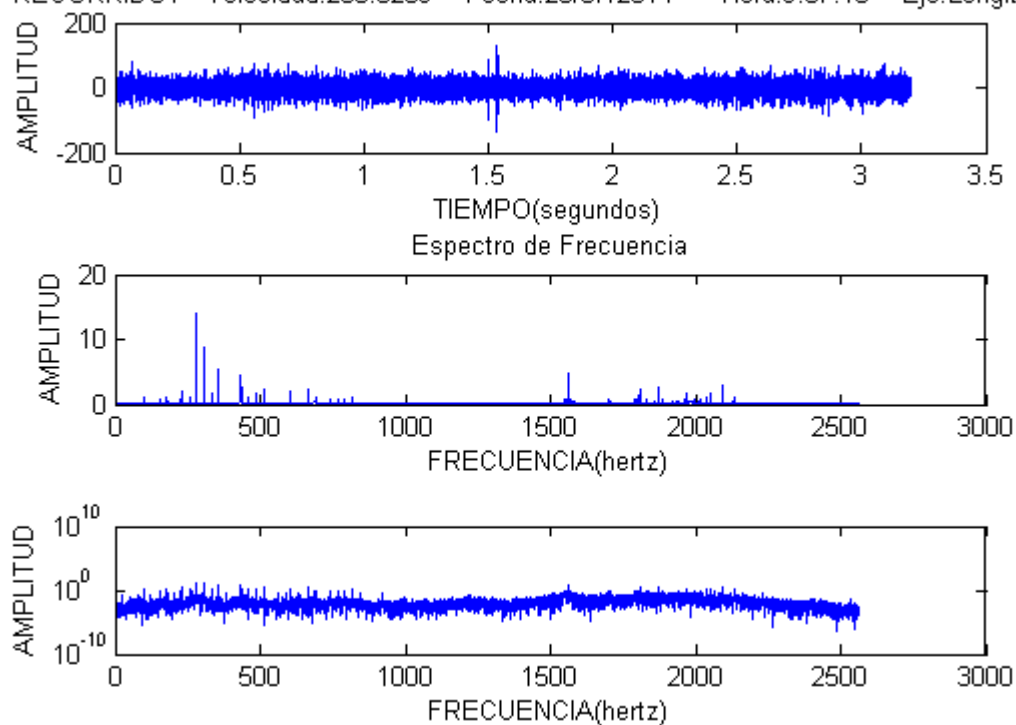
RECORRIDO1 Velocidad:267.4212 Fecha:23/07/2014 Hora:9:55:38 Eje:Longitudinal



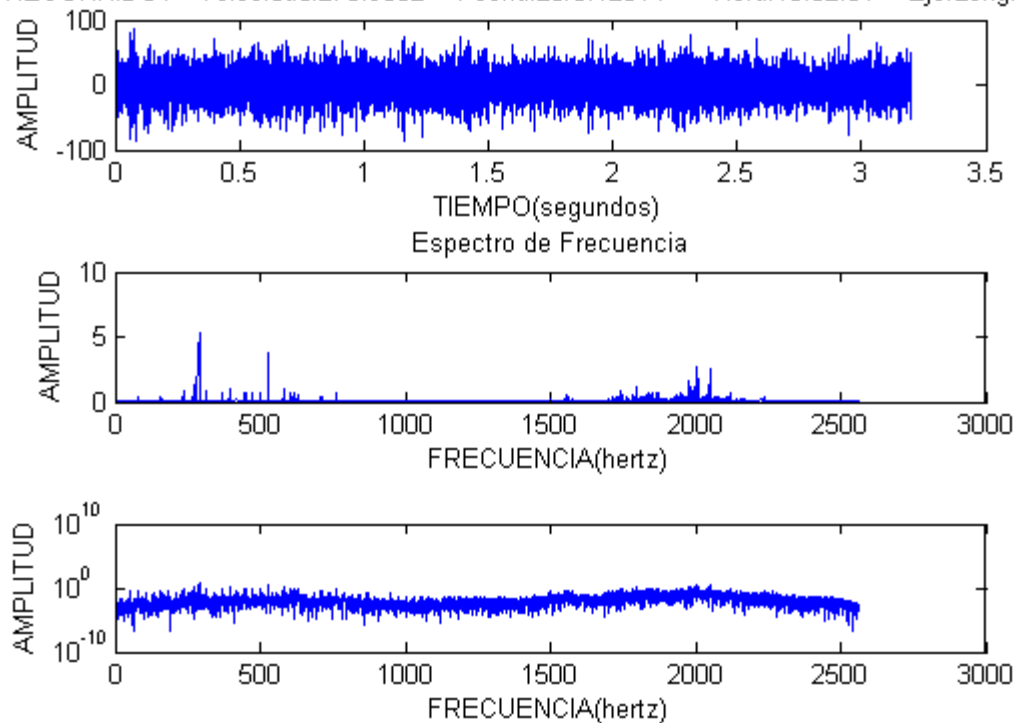
RECORRIDO1 Velocidad:262.4216 Fecha:23/07/2014 Hora:9:56:25 Eje:Longitudinal



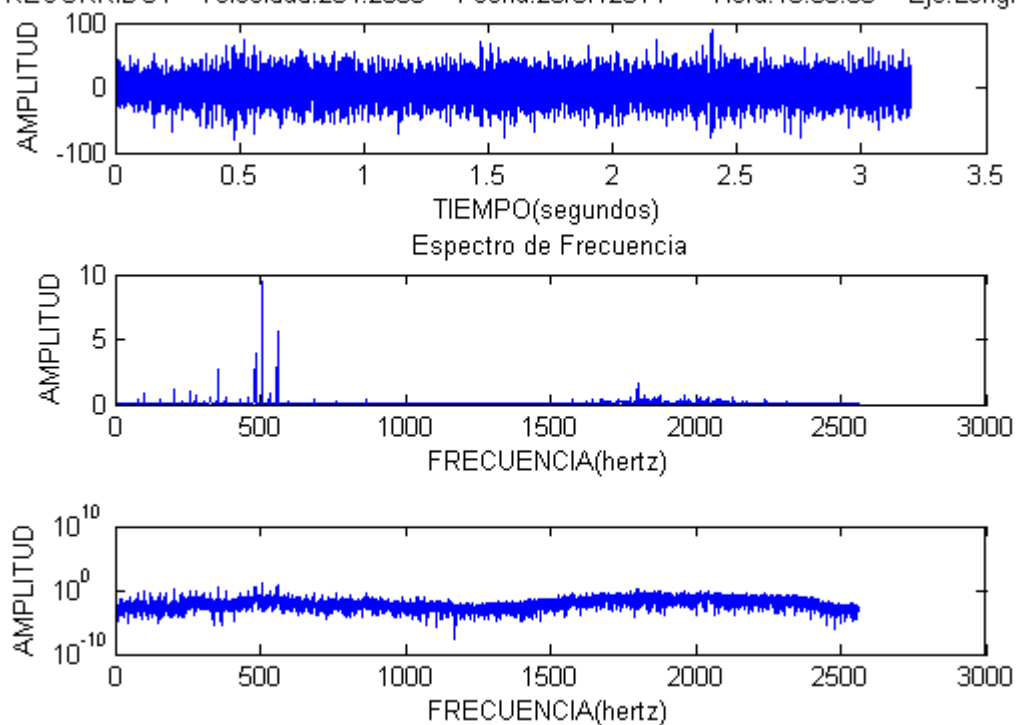
RECORRIDO1 Velocidad:265.6259 Fecha:23/07/2014 Hora:9:57:10 Eje:Longitudinal



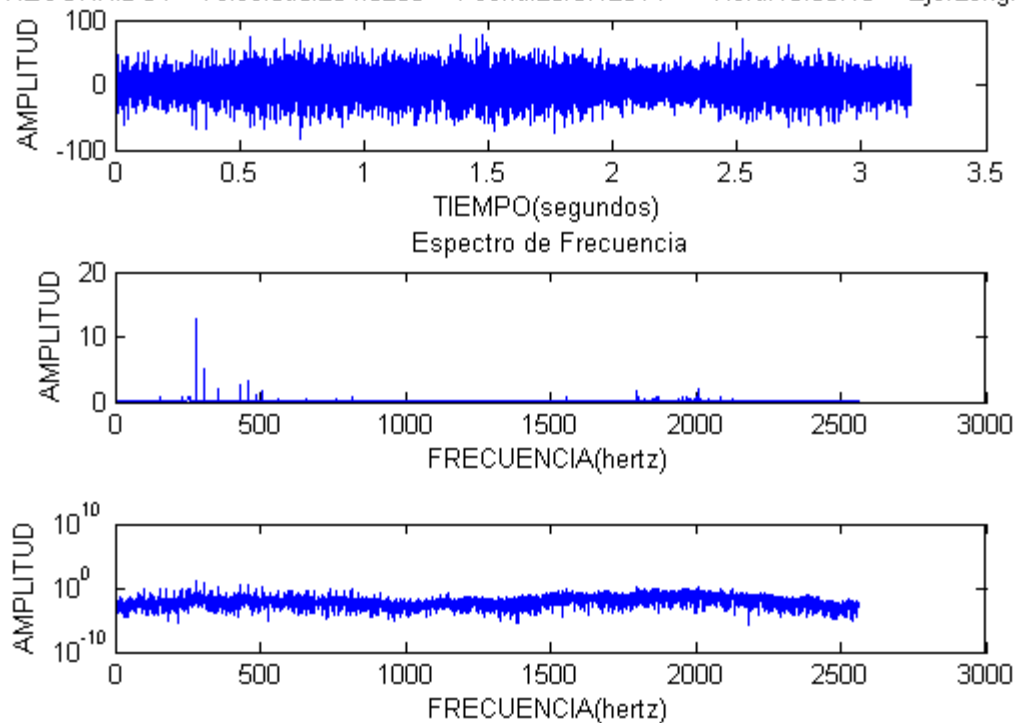
RECORRIDO1 Velocidad:273.9082 Fecha:23/07/2014 Hora:10:02:01 Eje:Longitudinal



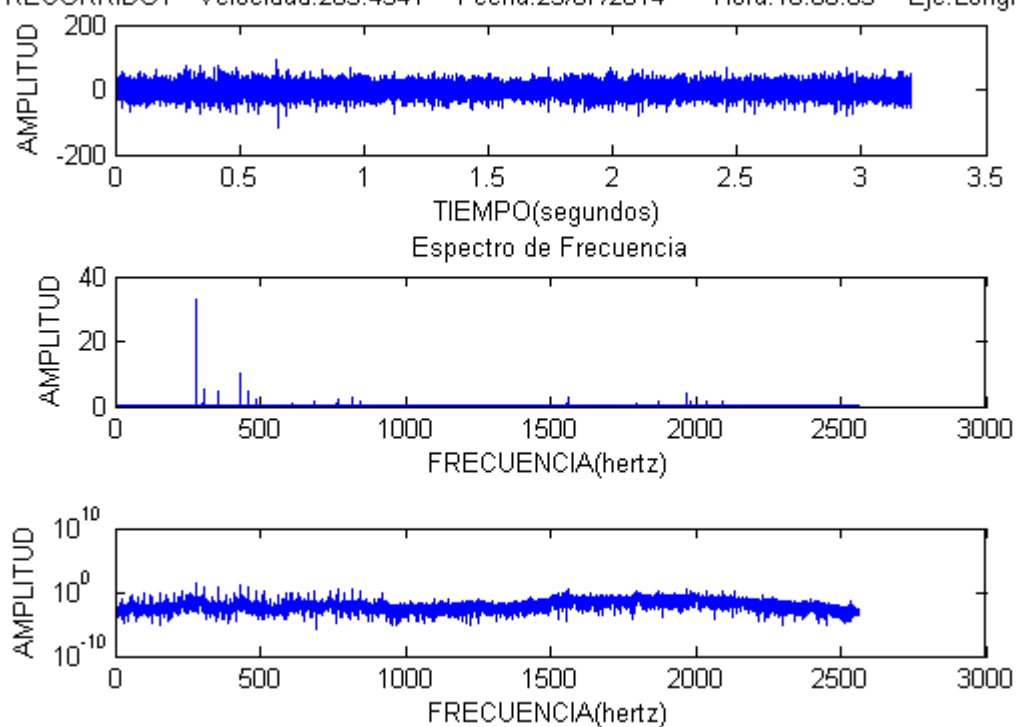
RECORRIDO1 Velocidad:264.2388 Fecha:23/07/2014 Hora:10:03:38 Eje:Longitudinal



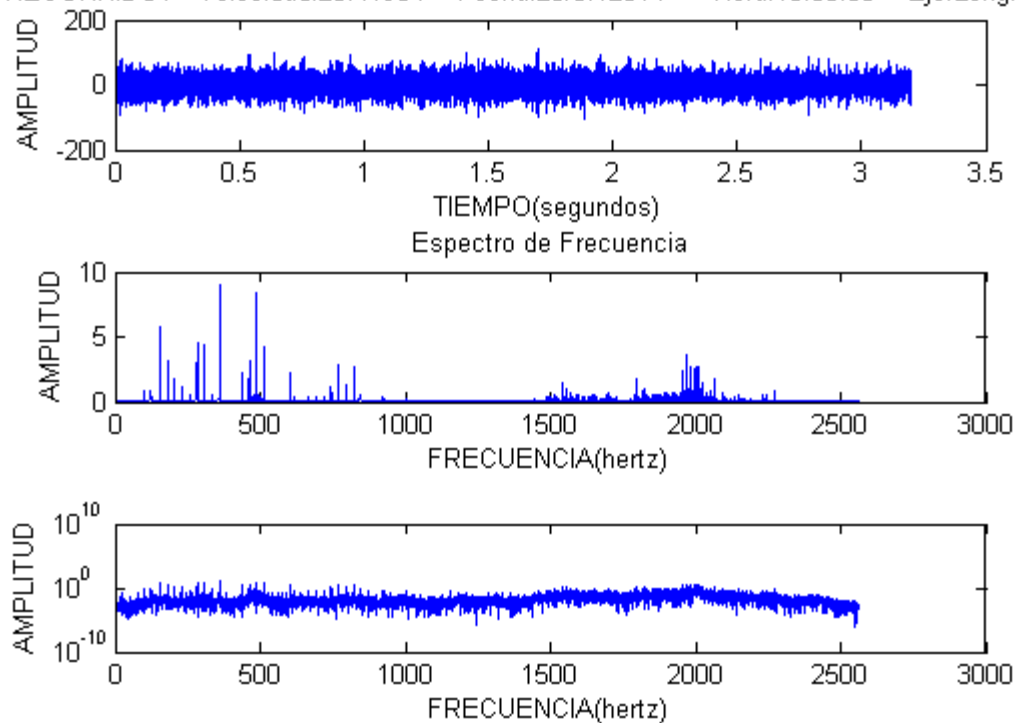
RECORRIDO1 Velocidad:264.6265 Fecha:23/07/2014 Hora:10:05:15 Eje:Longitudinal



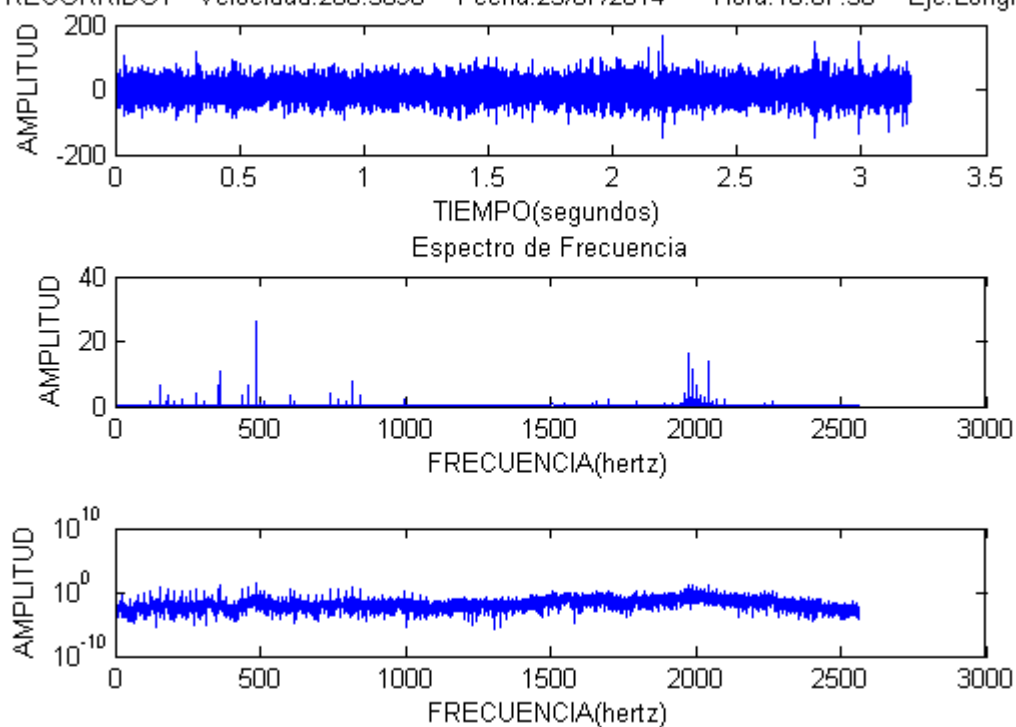
RECORRIDO1 Velocidad:265.4341 Fecha:23/07/2014 Hora:10:06:03 Eje:Longitudinal



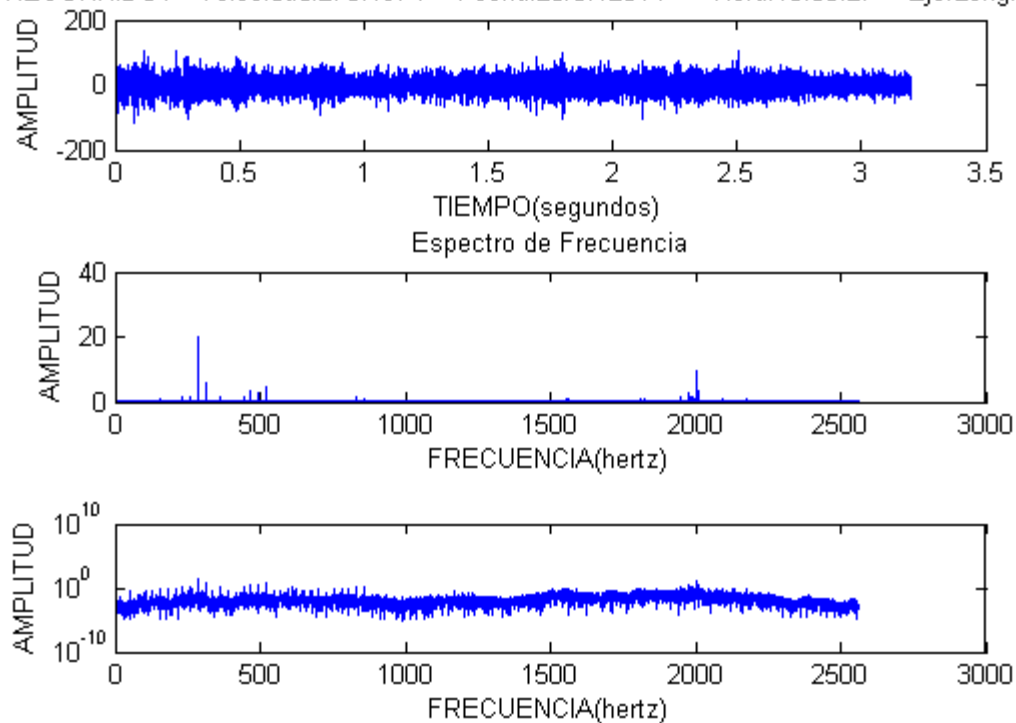
RECORRIDO1 Velocidad:267.1954 Fecha:23/07/2014 Hora:10:06:50 Eje:Longitudinal



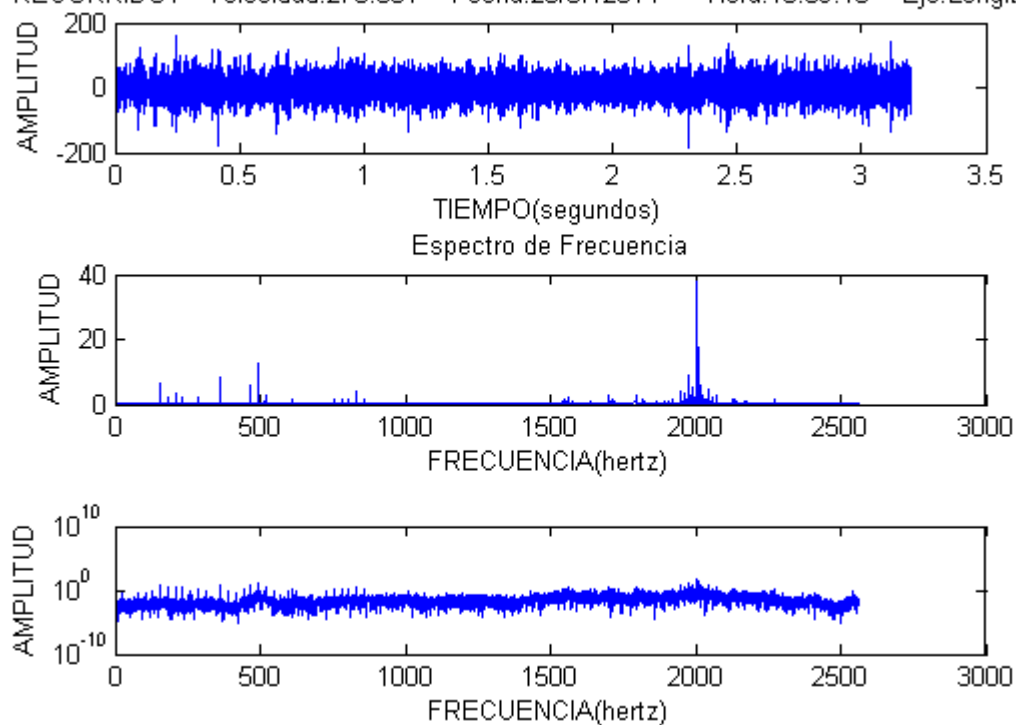
RECORRIDO1 Velocidad:266.3098 Fecha:23/07/2014 Hora:10:07:38 Eje:Longitudinal



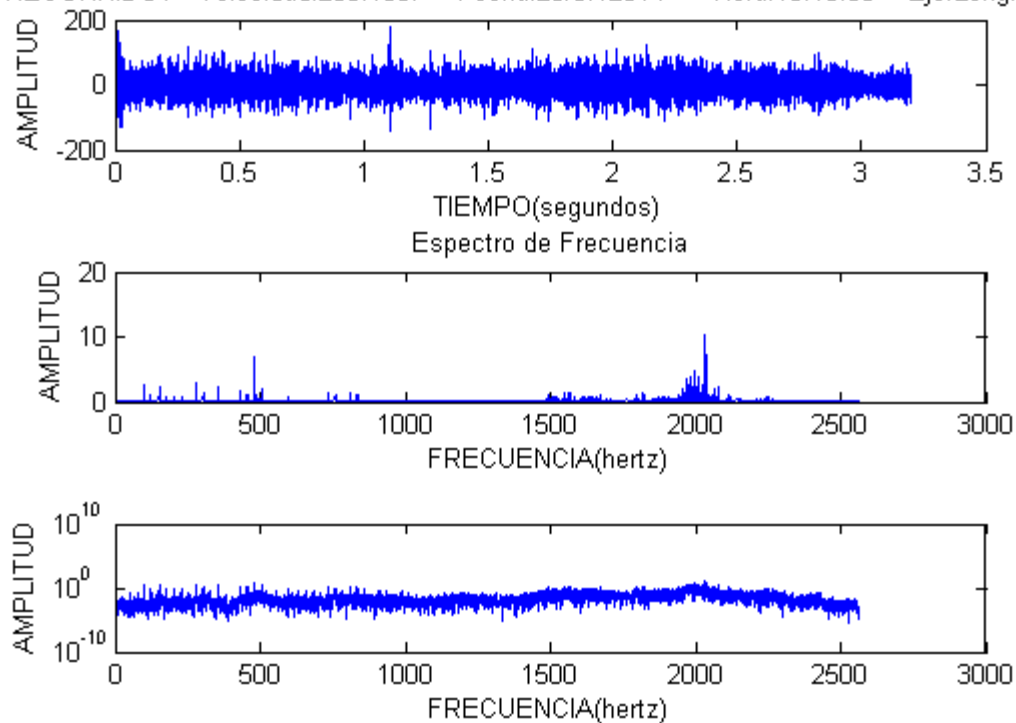
RECORRIDO1 Velocidad:270.1974 Fecha:23/07/2014 Hora:10:08:27 Eje:Longitudinal



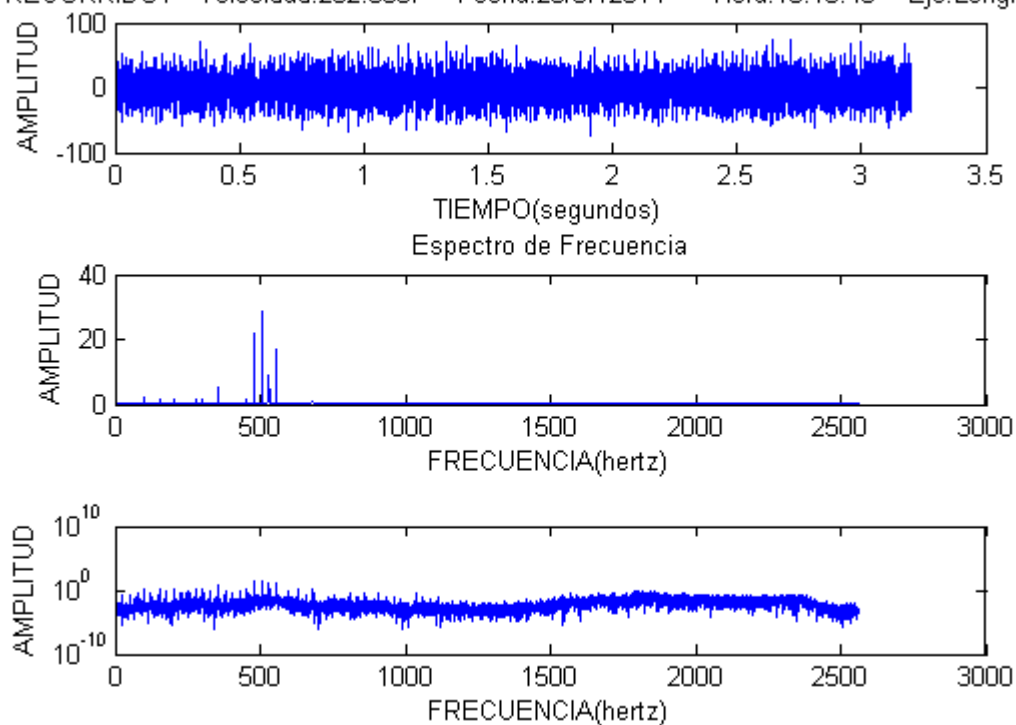
RECORRIDO1 Velocidad:270.301 Fecha:23/07/2014 Hora:10:09:15 Eje:Longitudinal



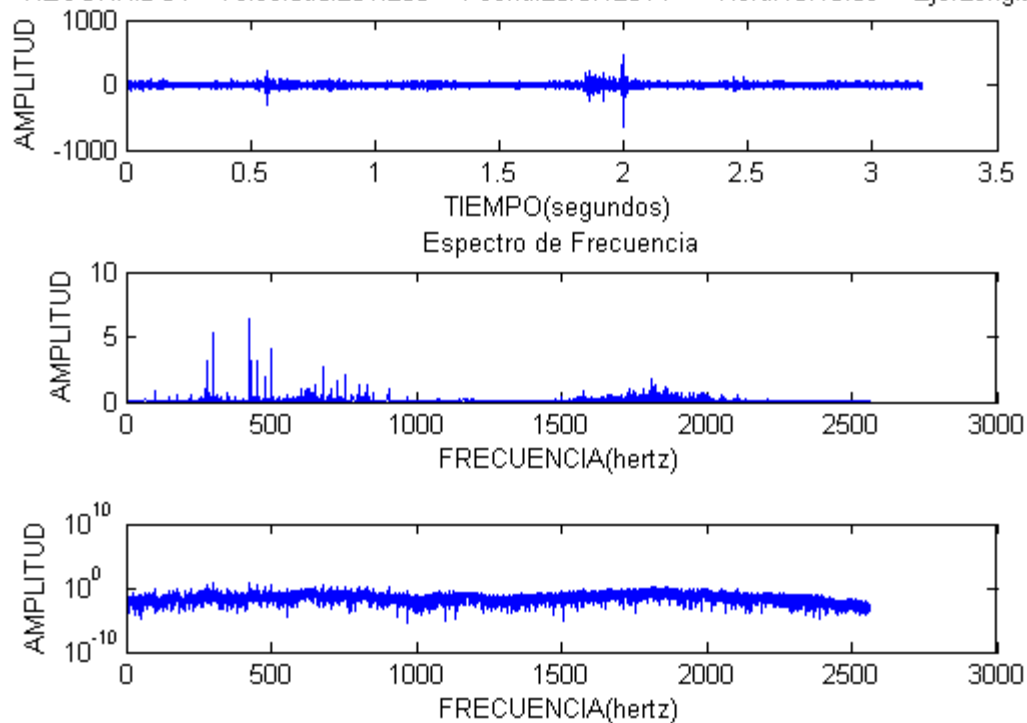
RECORRIDO1 Velocidad:263.1667 Fecha:23/07/2014 Hora:10:10:00 Eje:Longitudinal

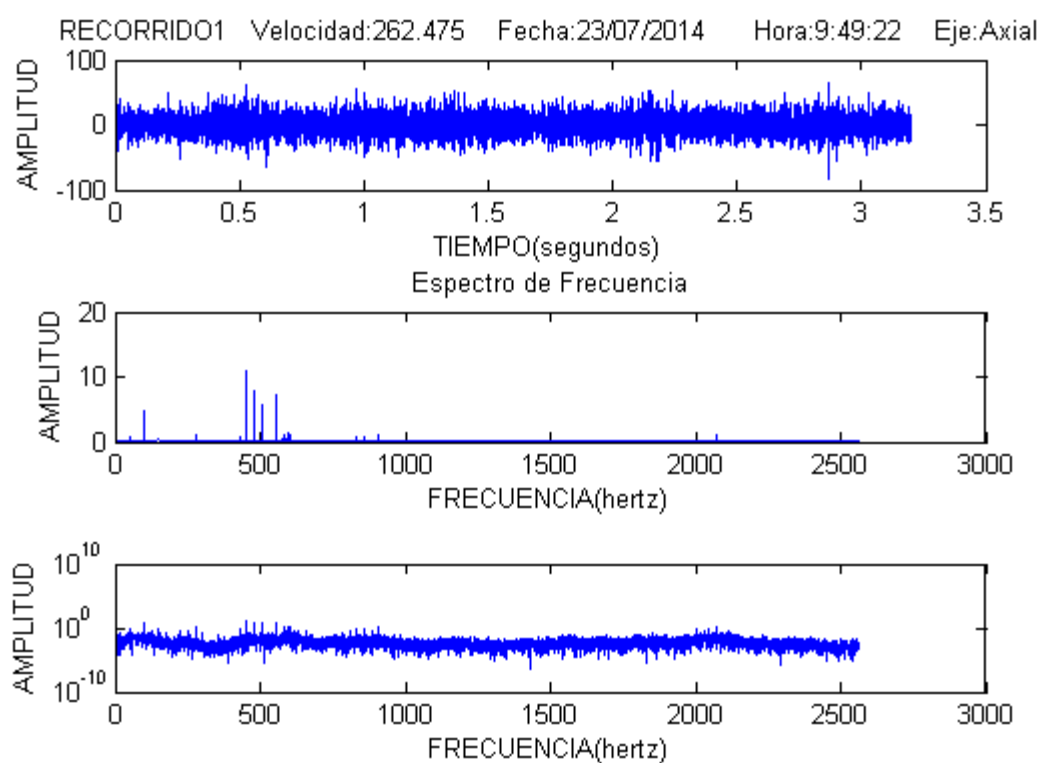
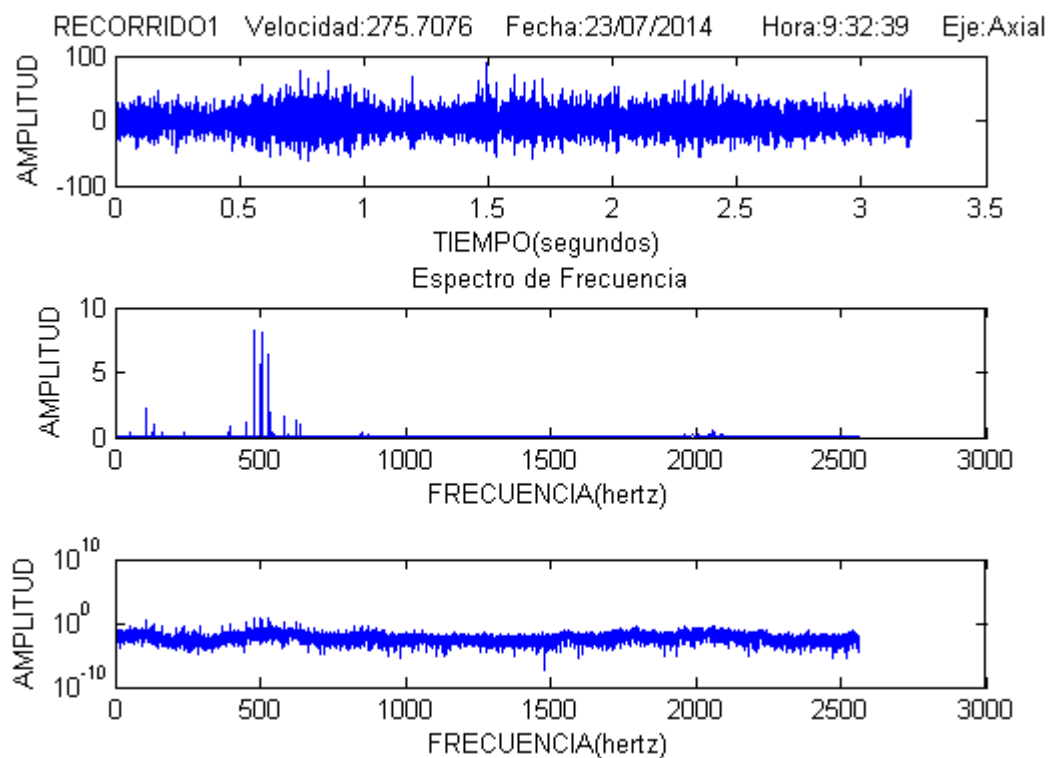


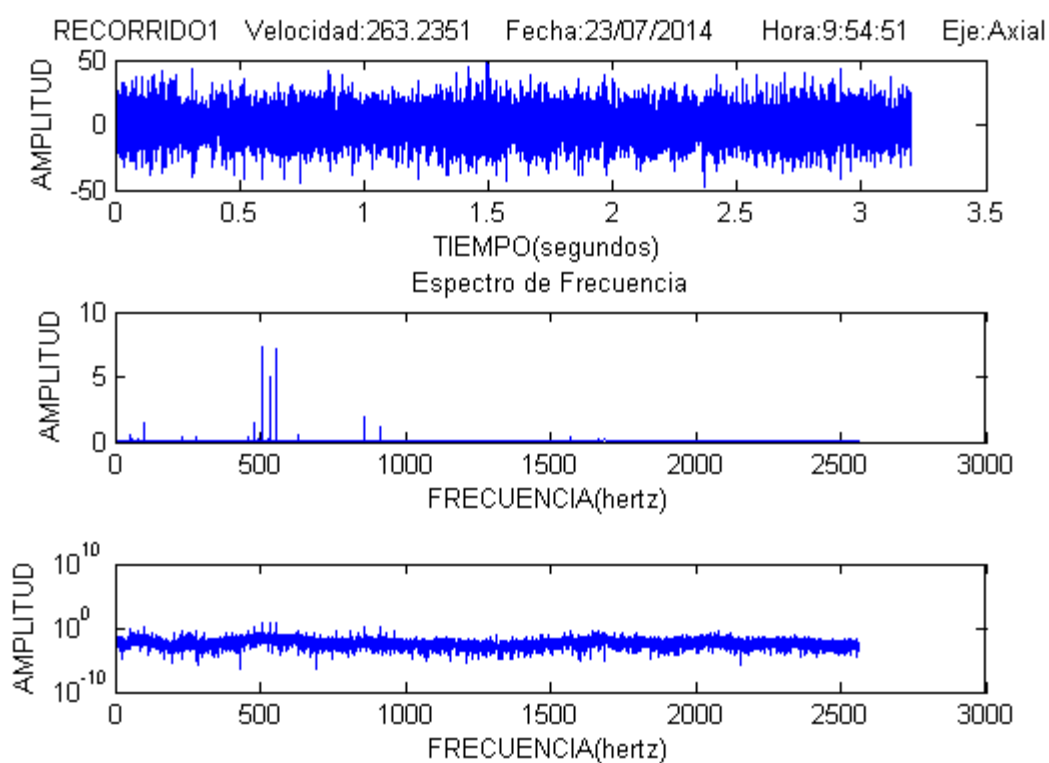
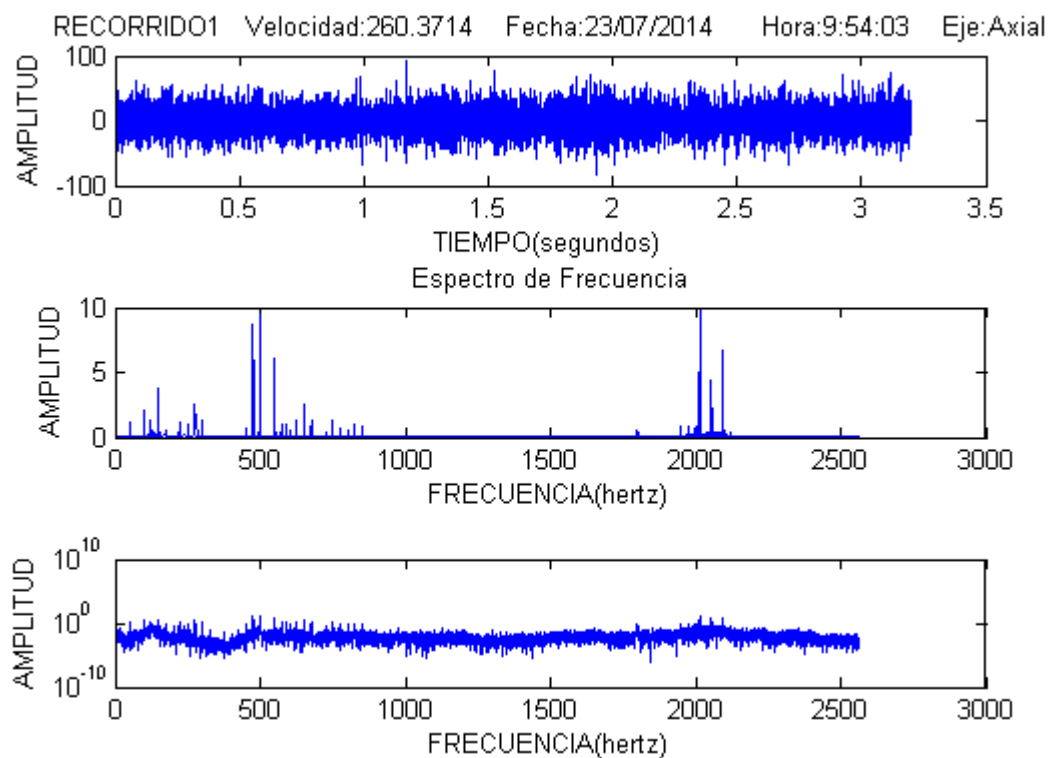
RECORRIDO1 Velocidad:262.8587 Fecha:23/07/2014 Hora:10:10:48 Eje:Longitudinal

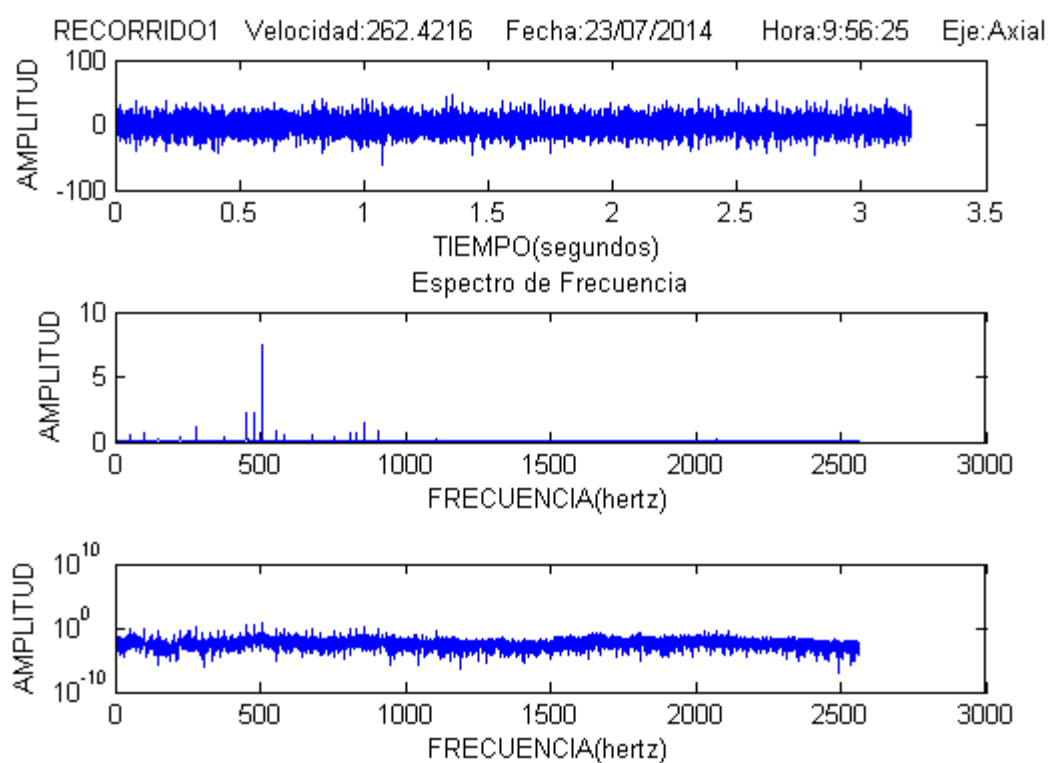
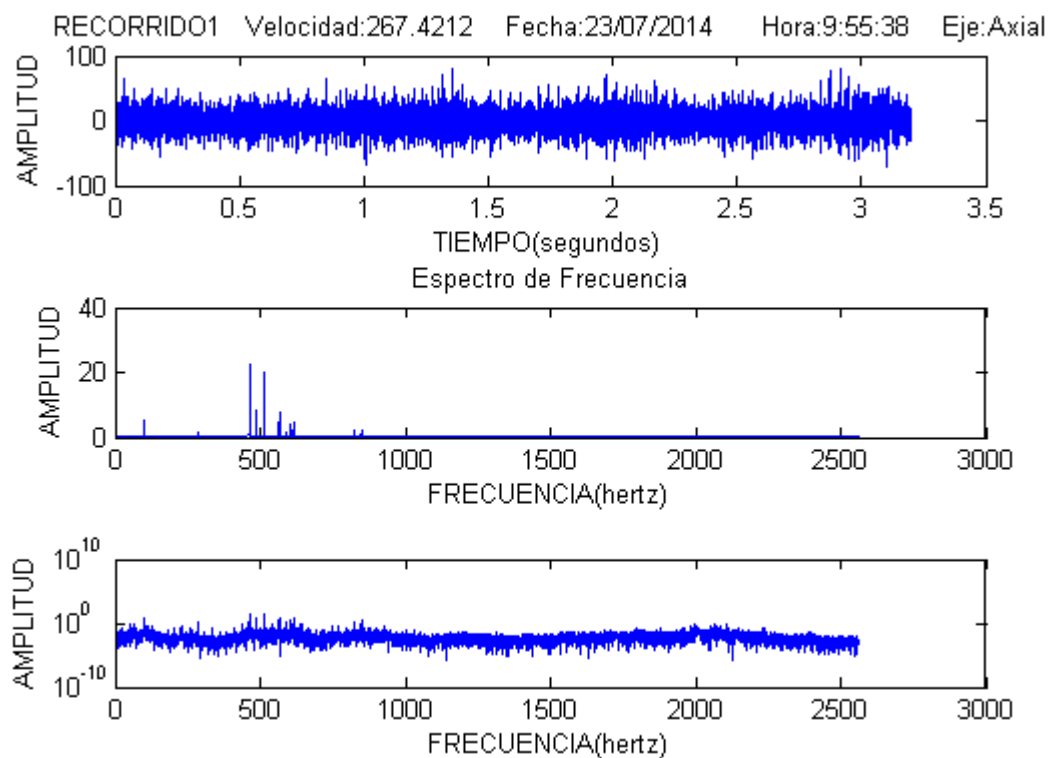


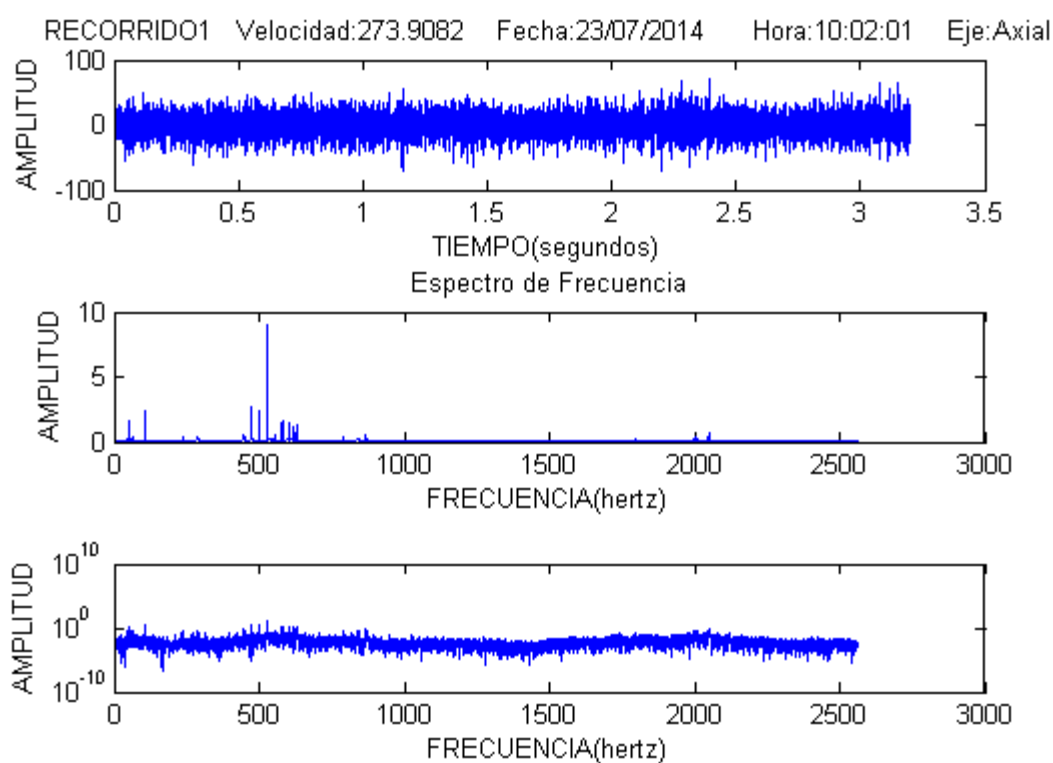
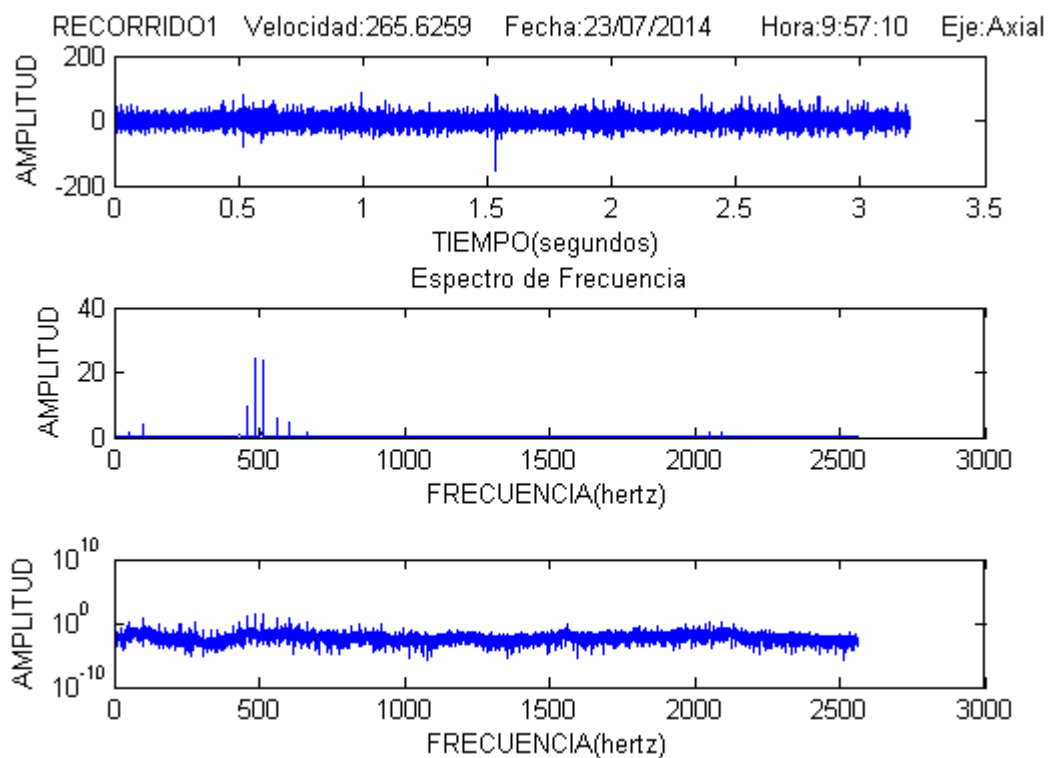
RECORRIDO1 Velocidad:261.206 Fecha:23/07/2014 Hora:10:13:09 Eje:Longitudinal

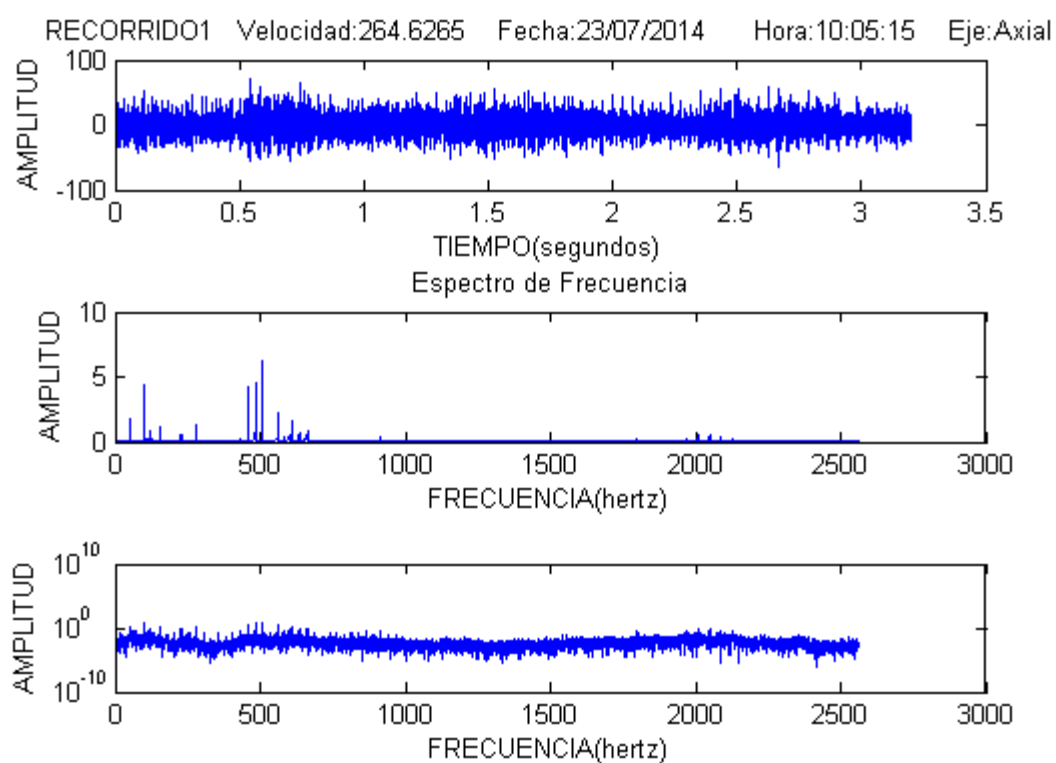
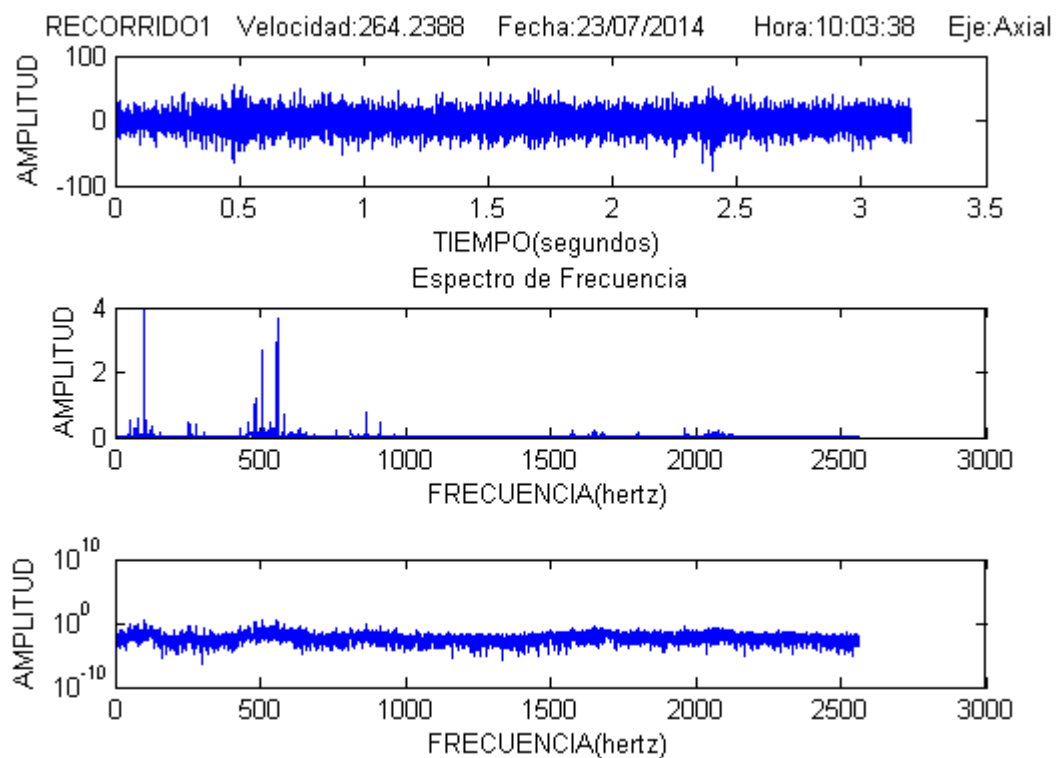


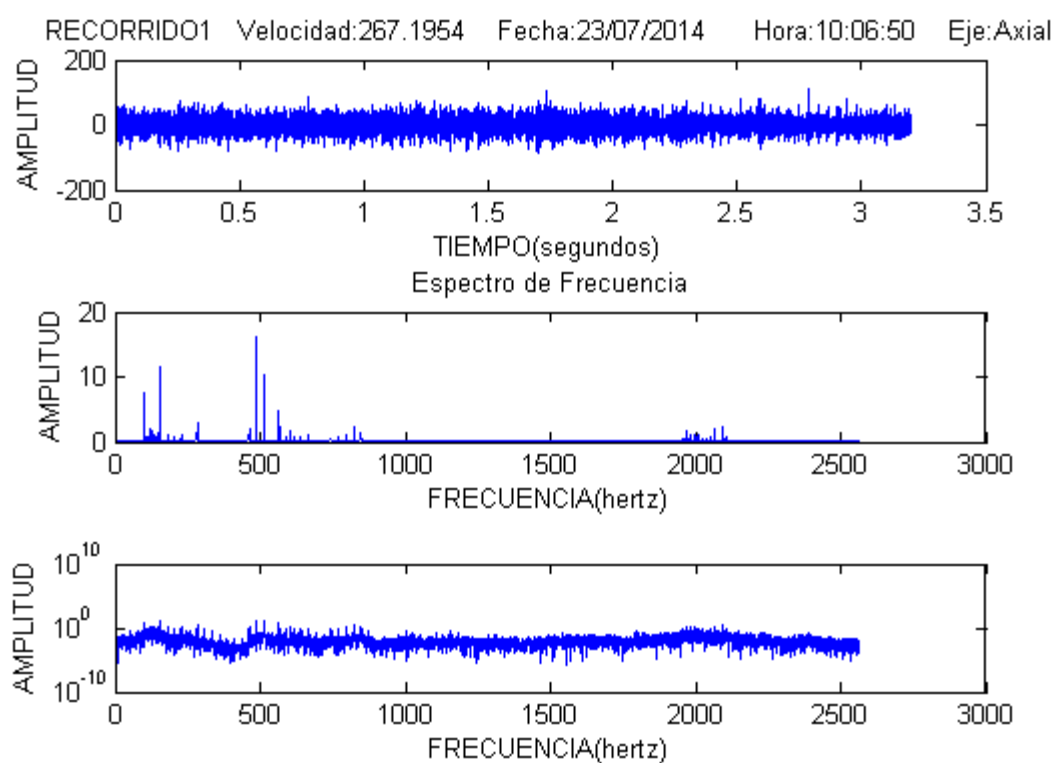
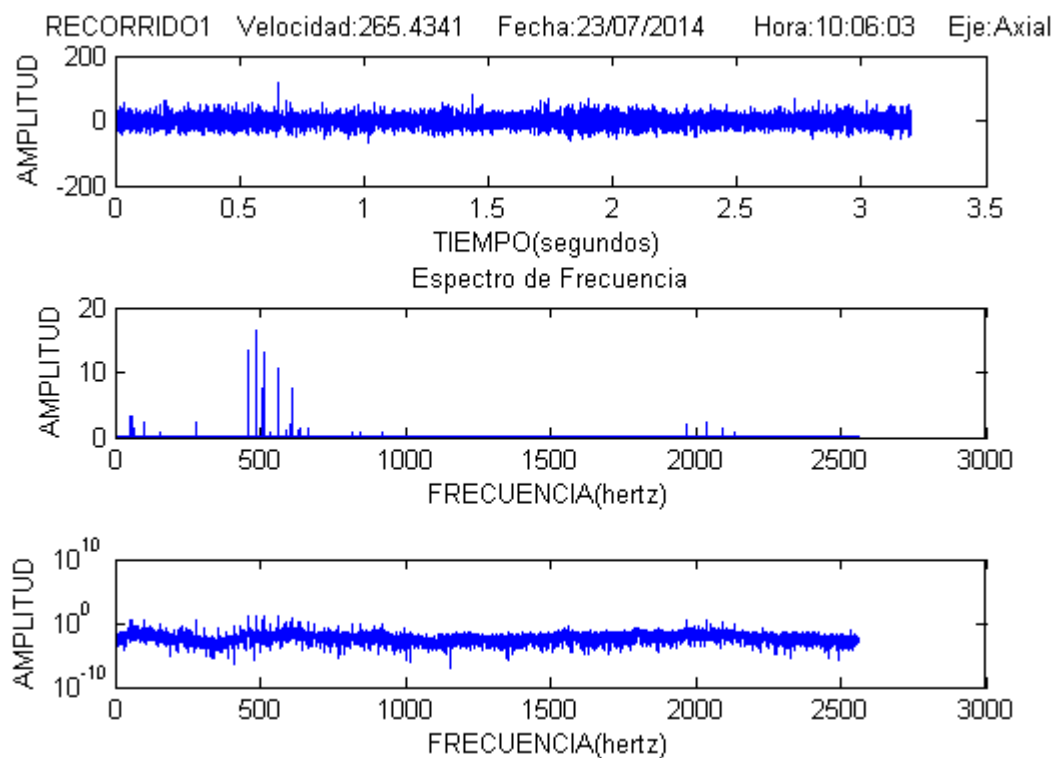


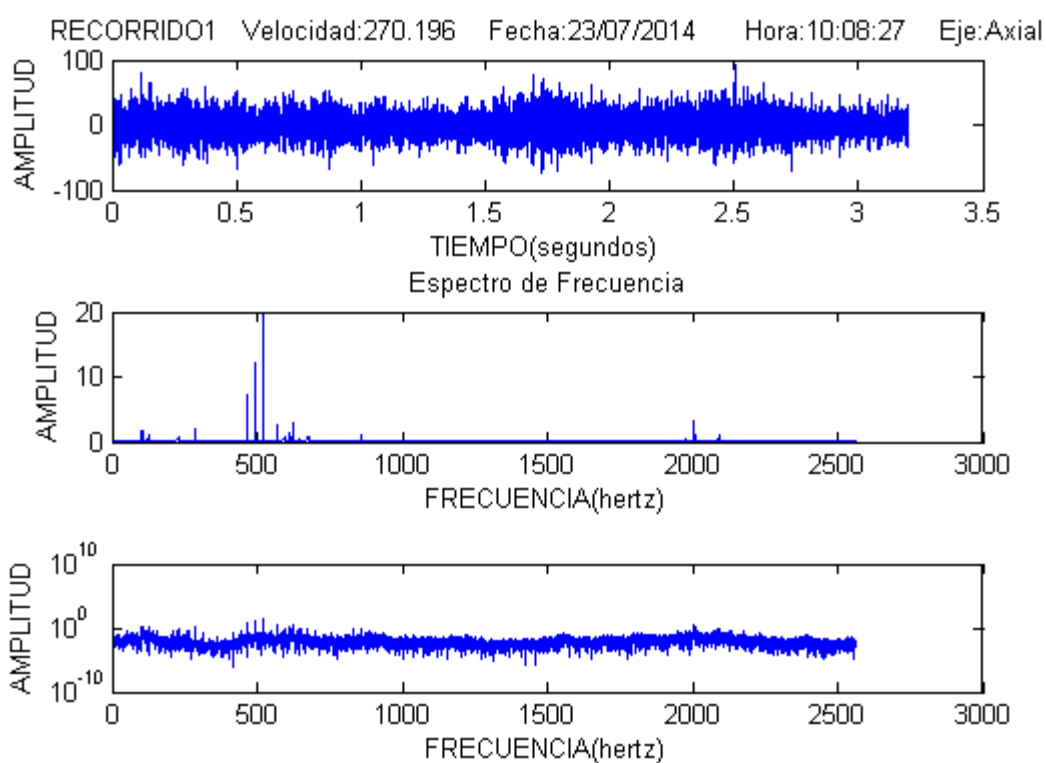
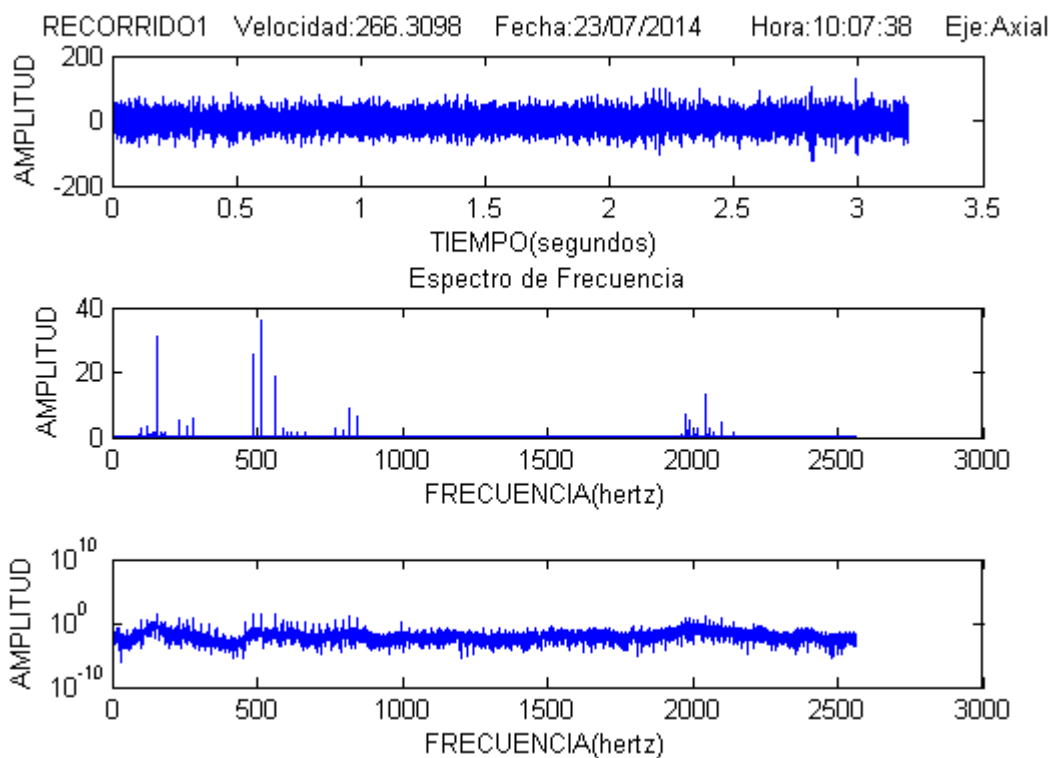


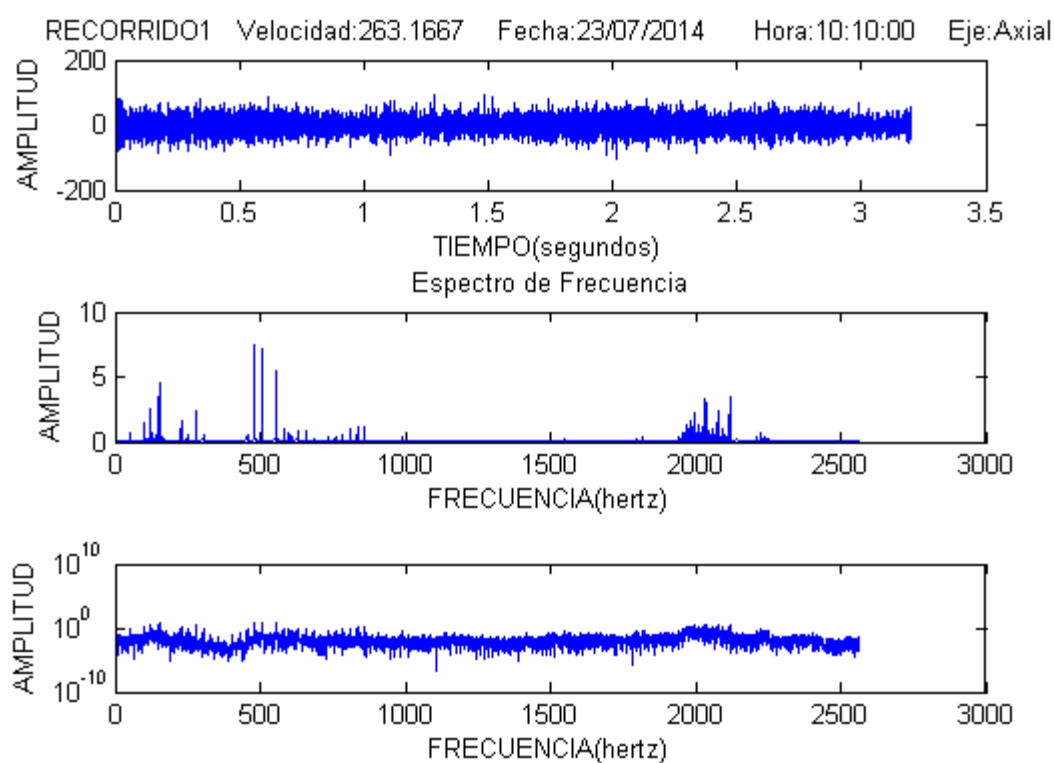
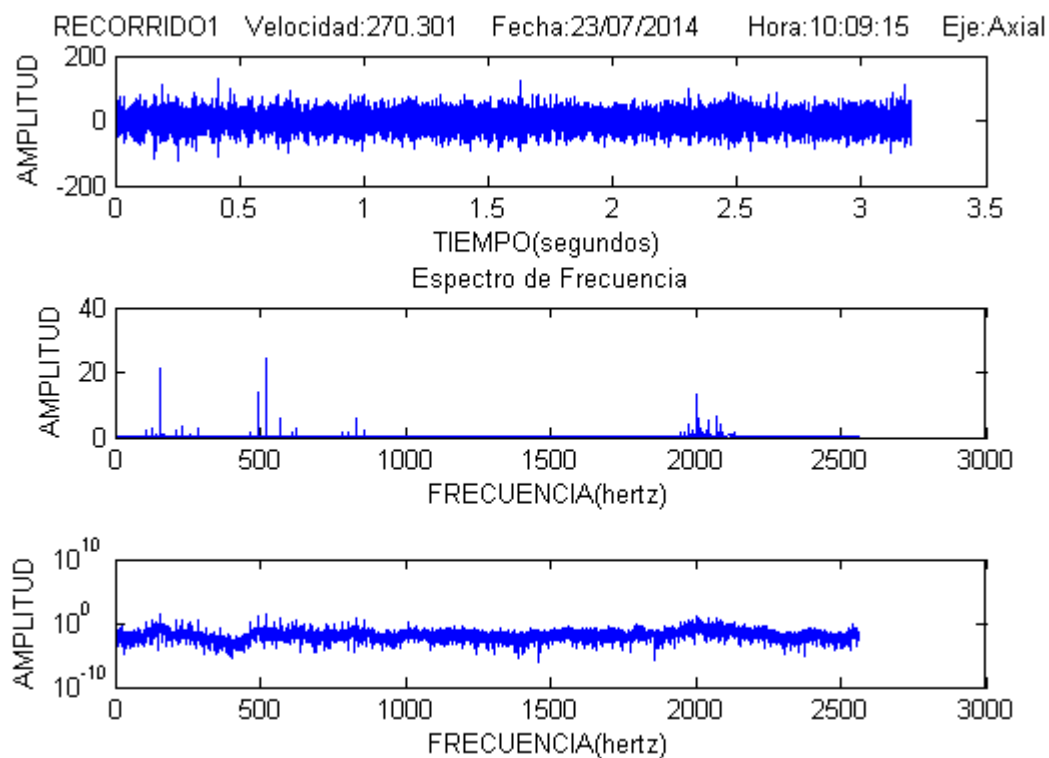




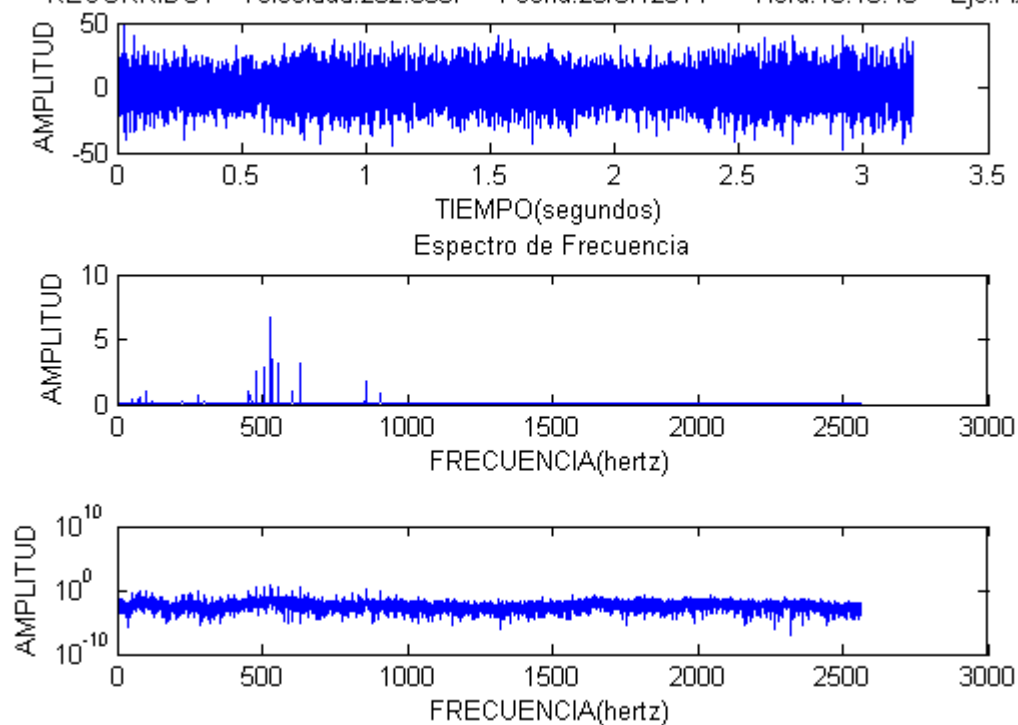




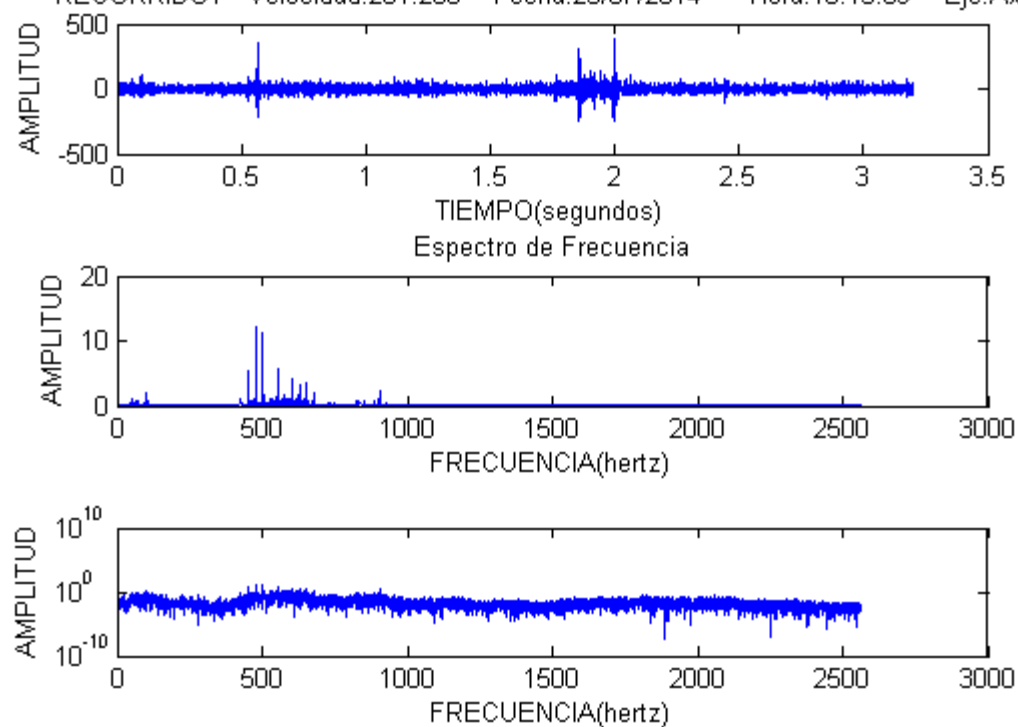


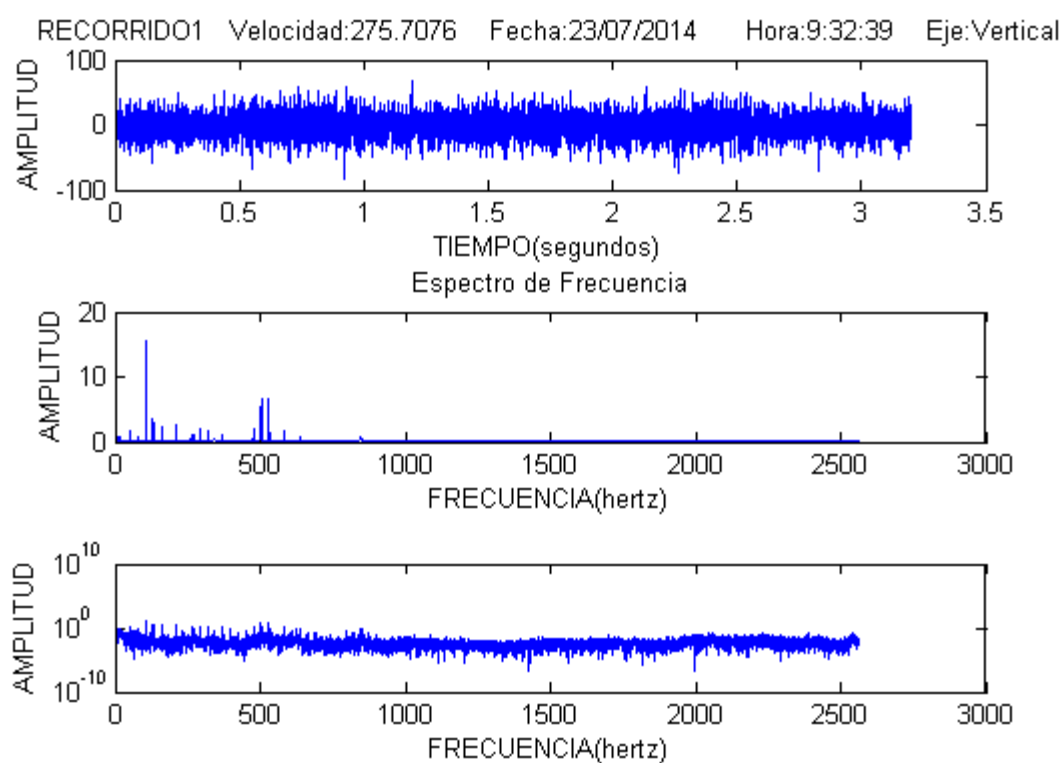
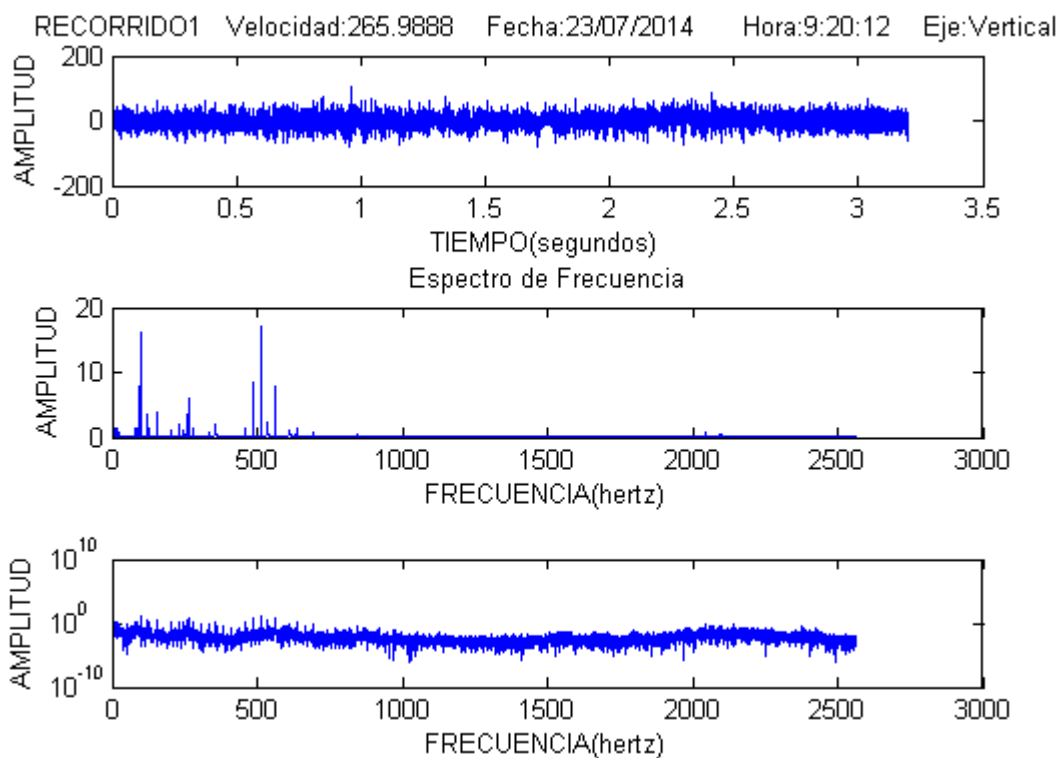


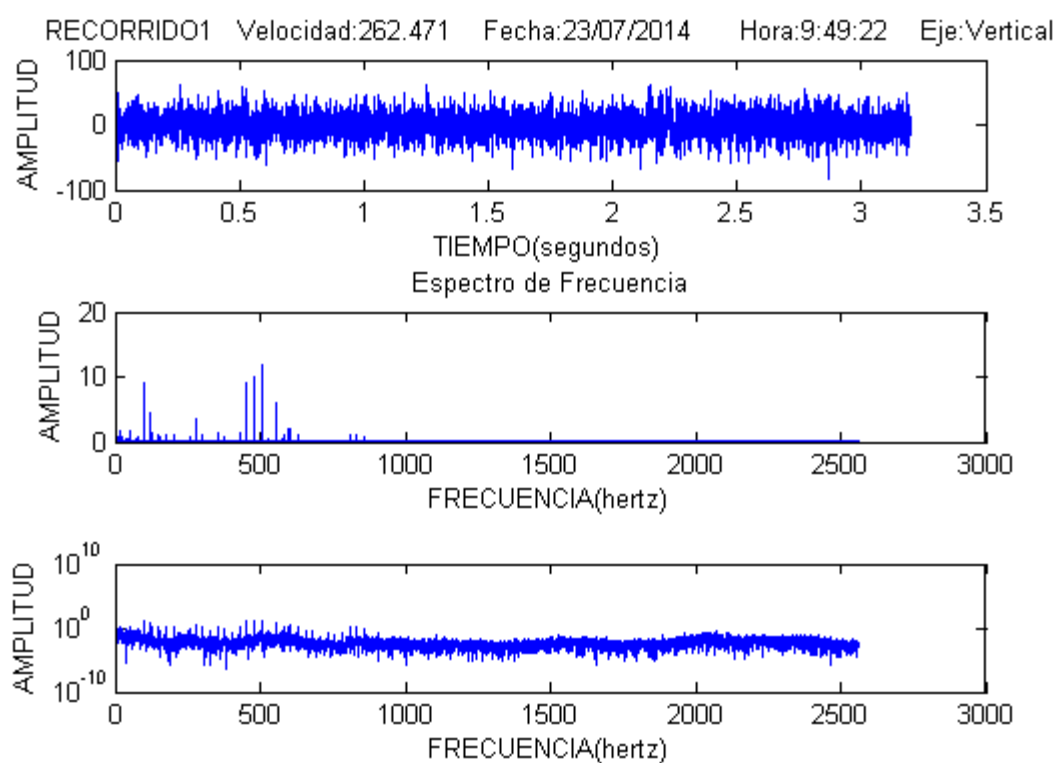
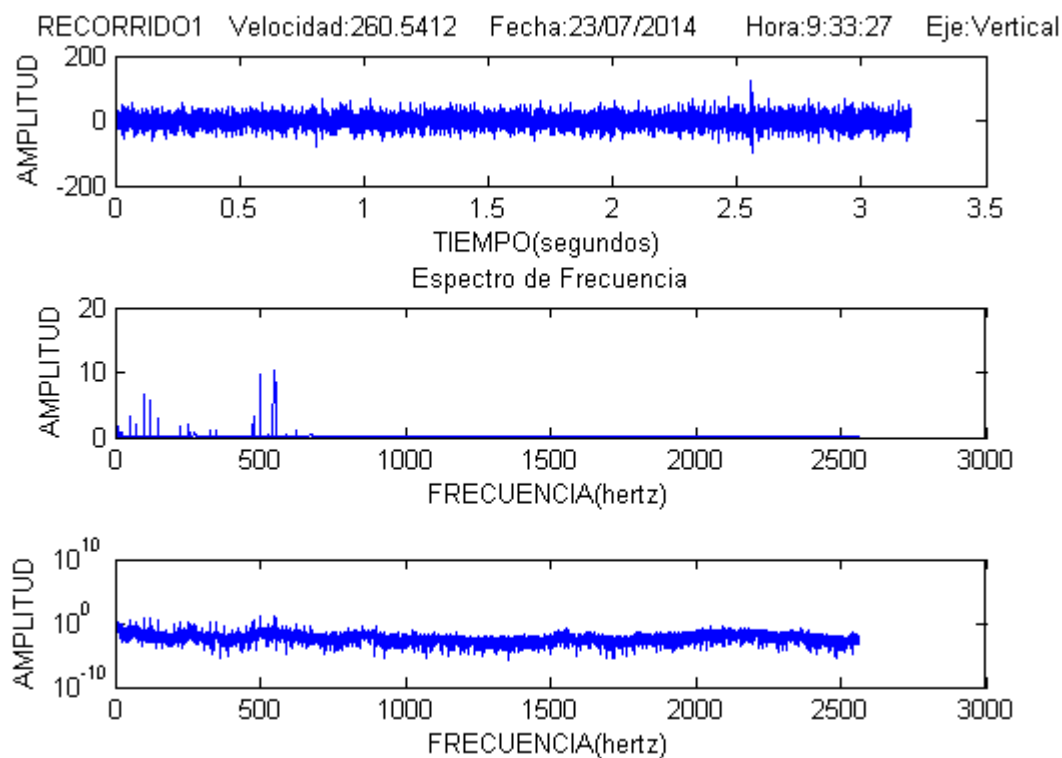
RECORRIDO1 Velocidad:262.8587 Fecha:23/07/2014 Hora:10:10:48 Eje:Axial

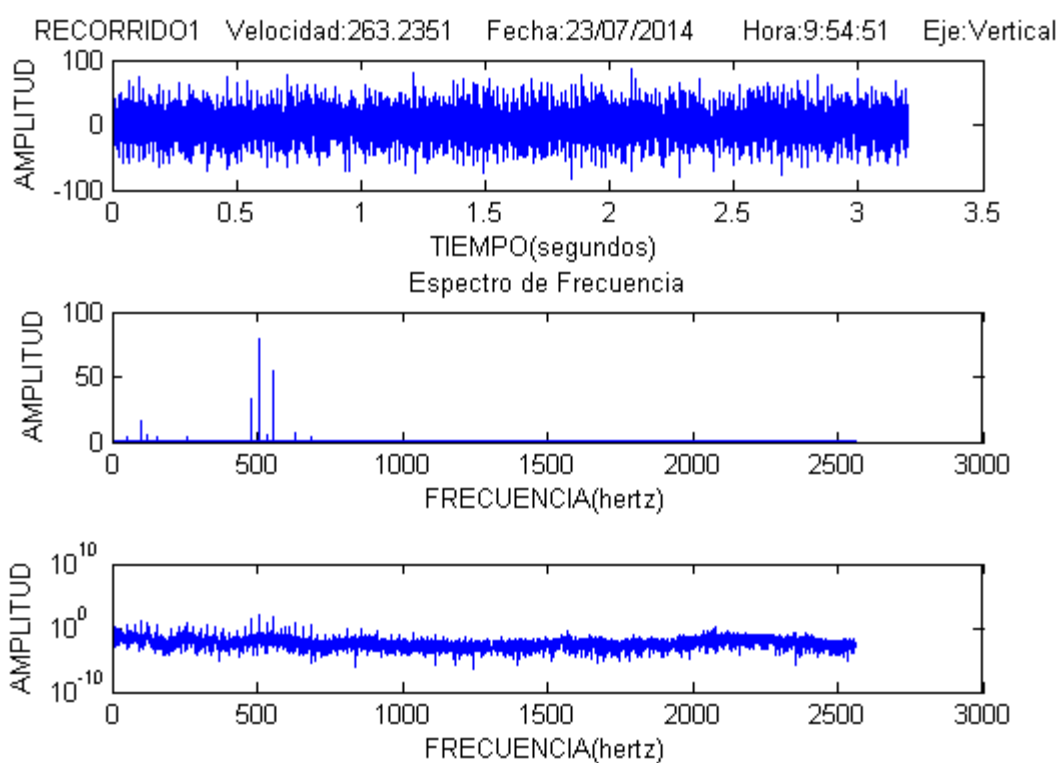
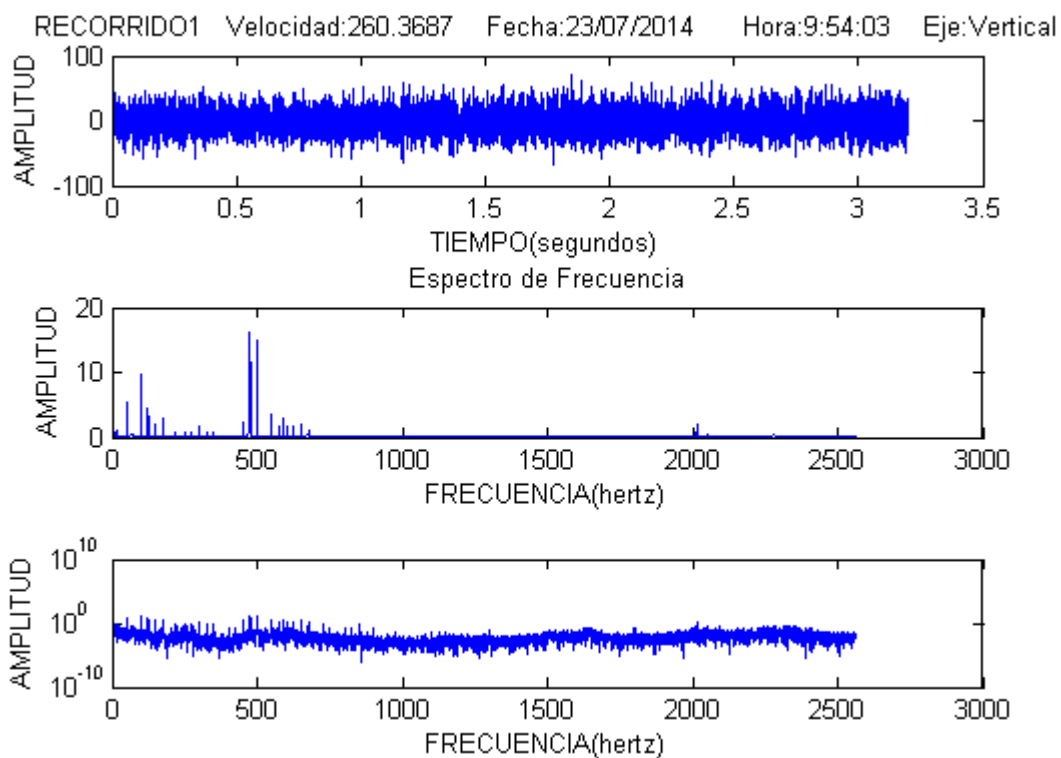


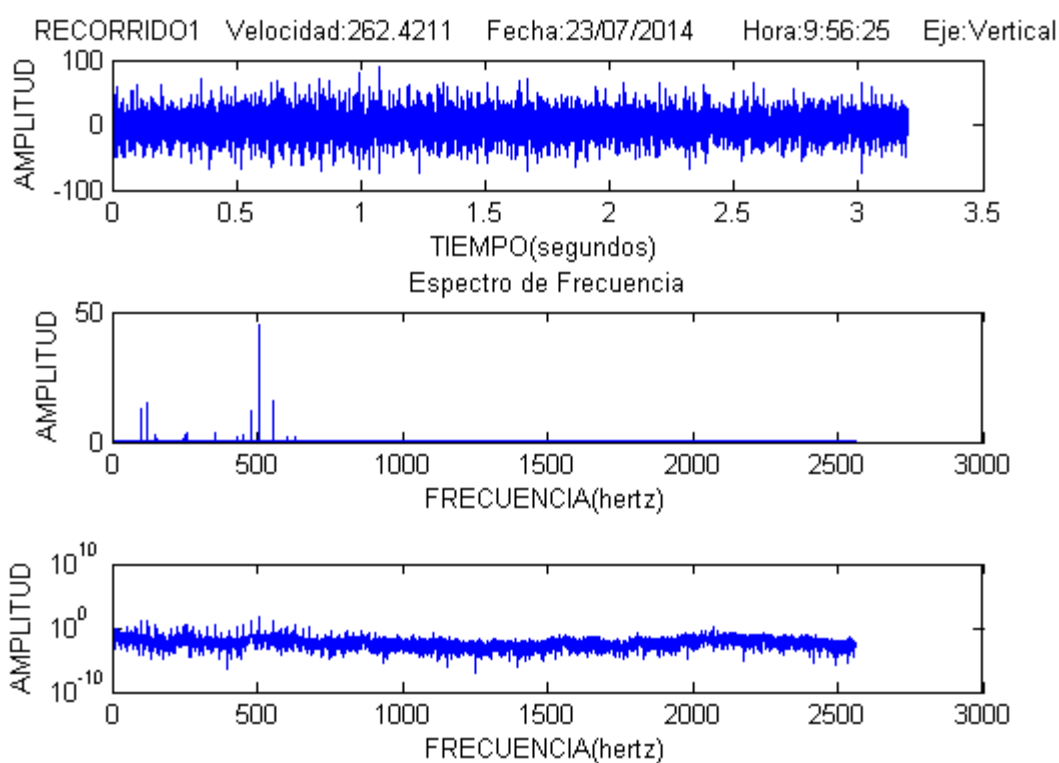
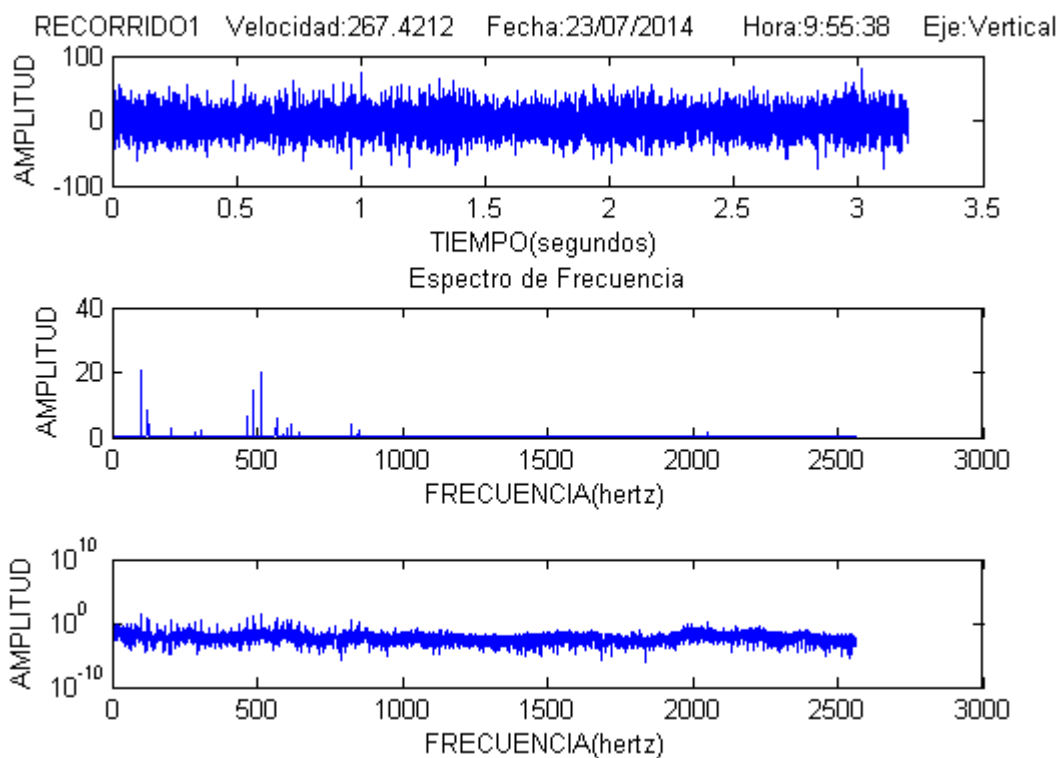
RECORRIDO1 Velocidad:261.206 Fecha:23/07/2014 Hora:10:13:09 Eje:Axial

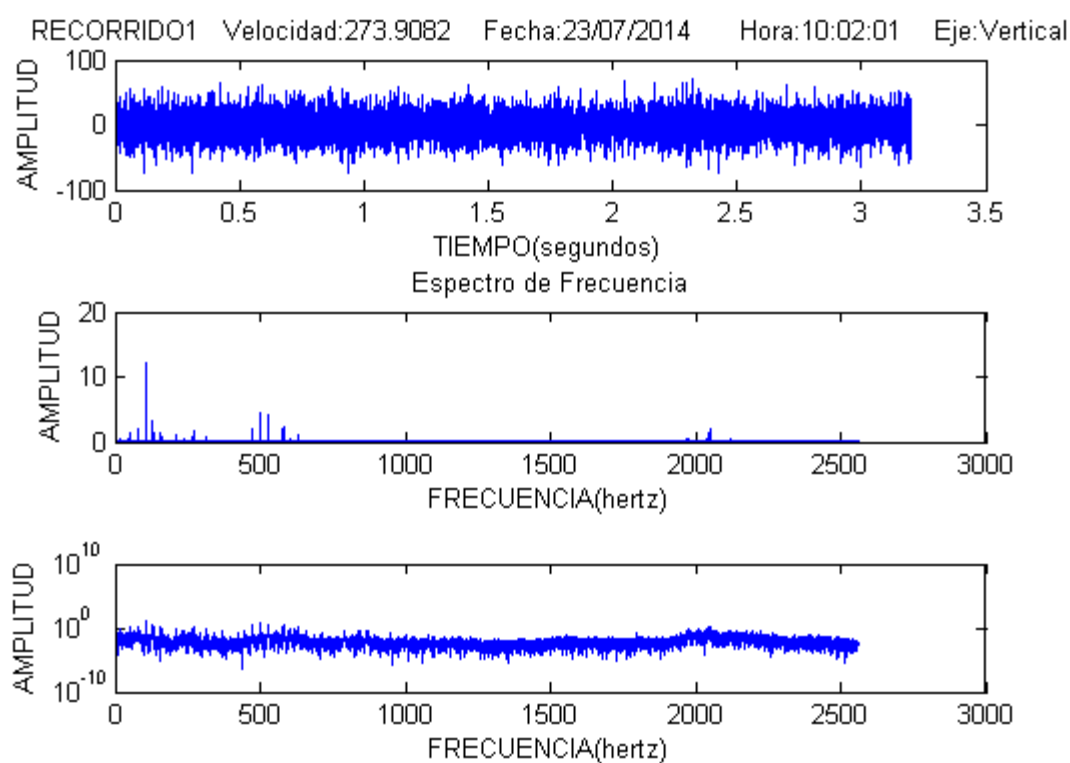
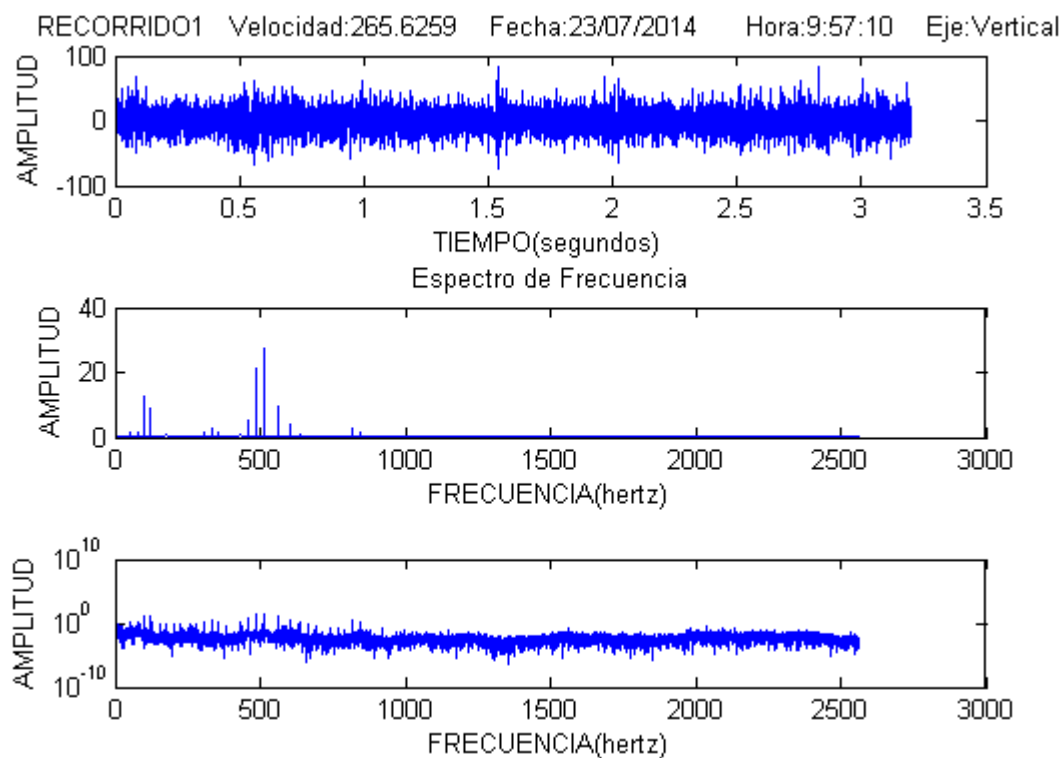


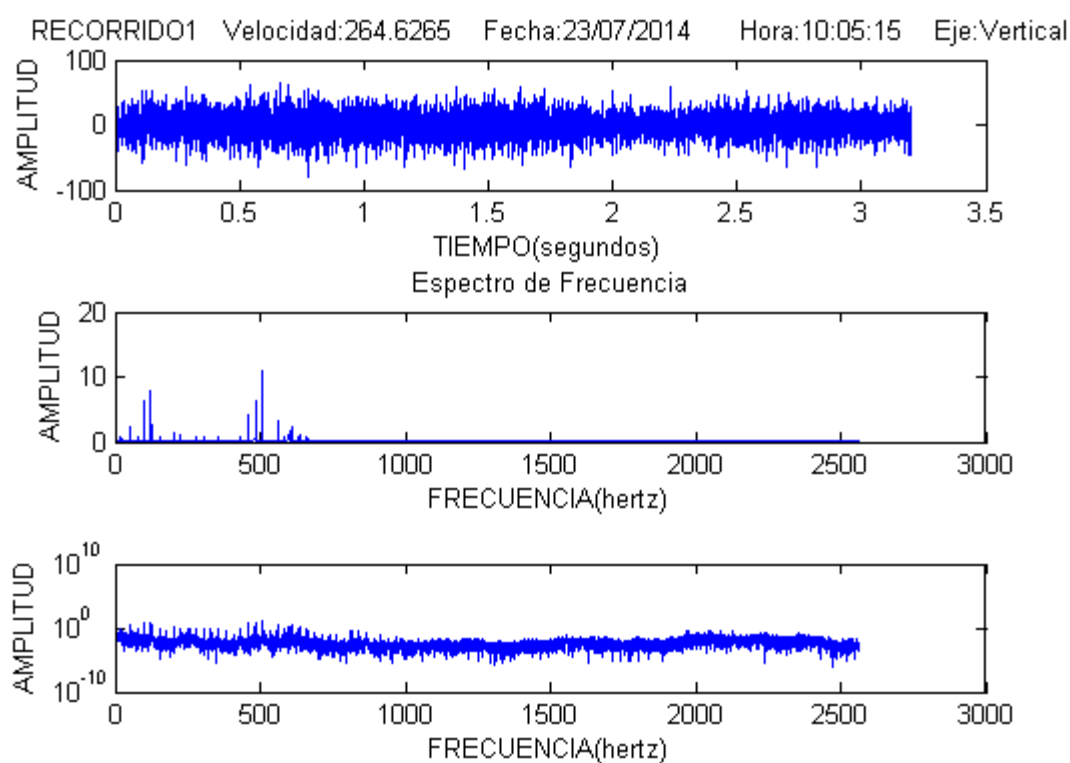
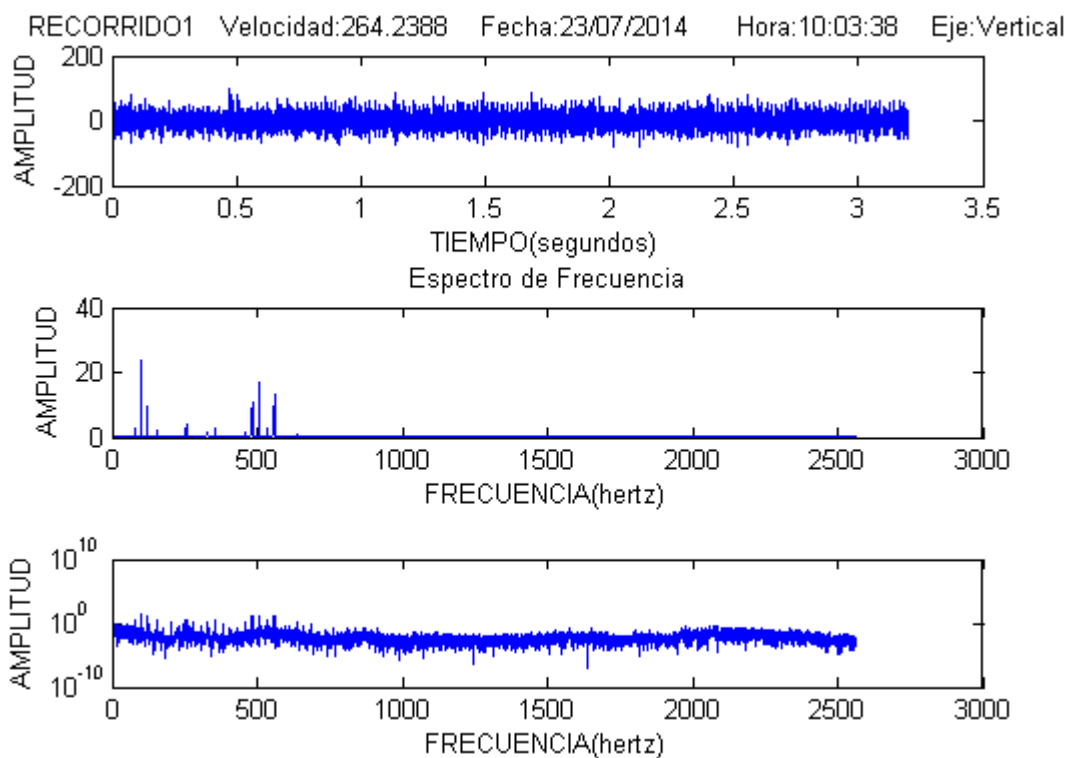


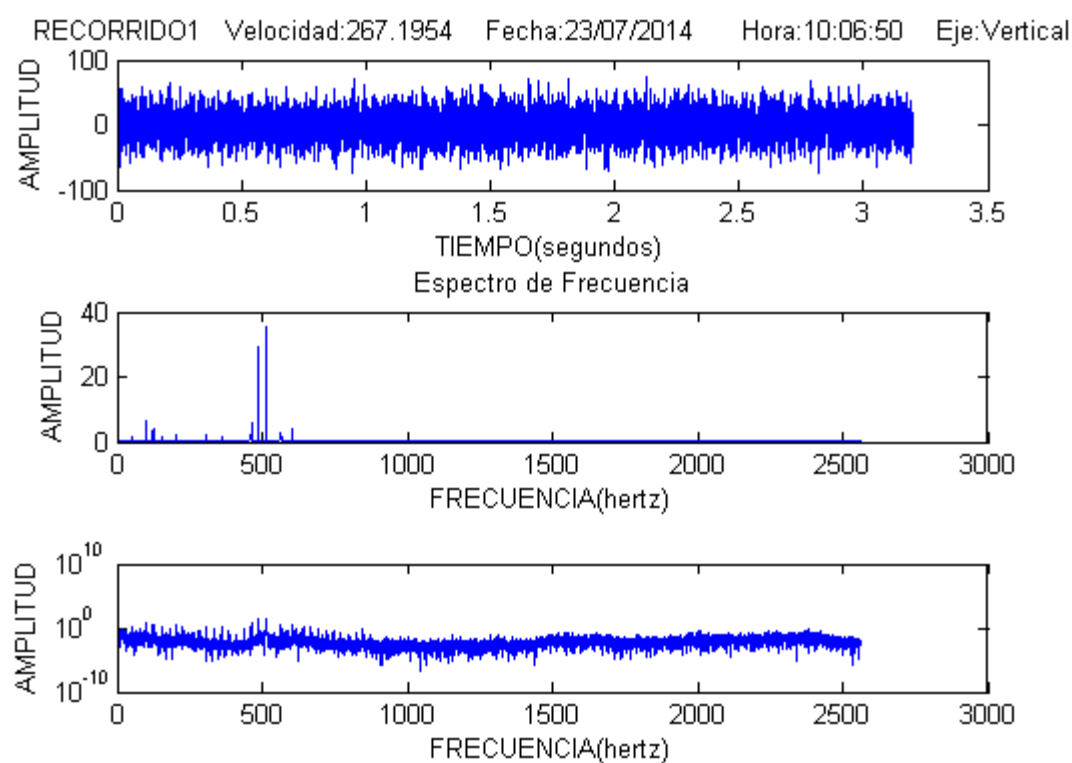
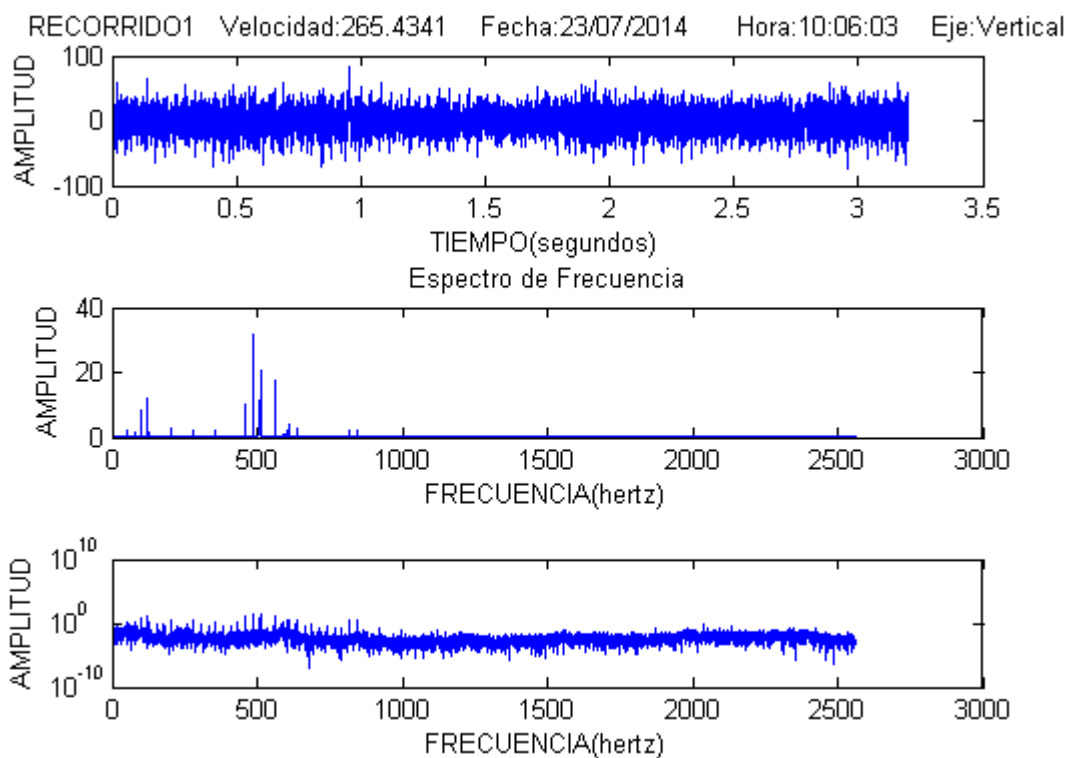


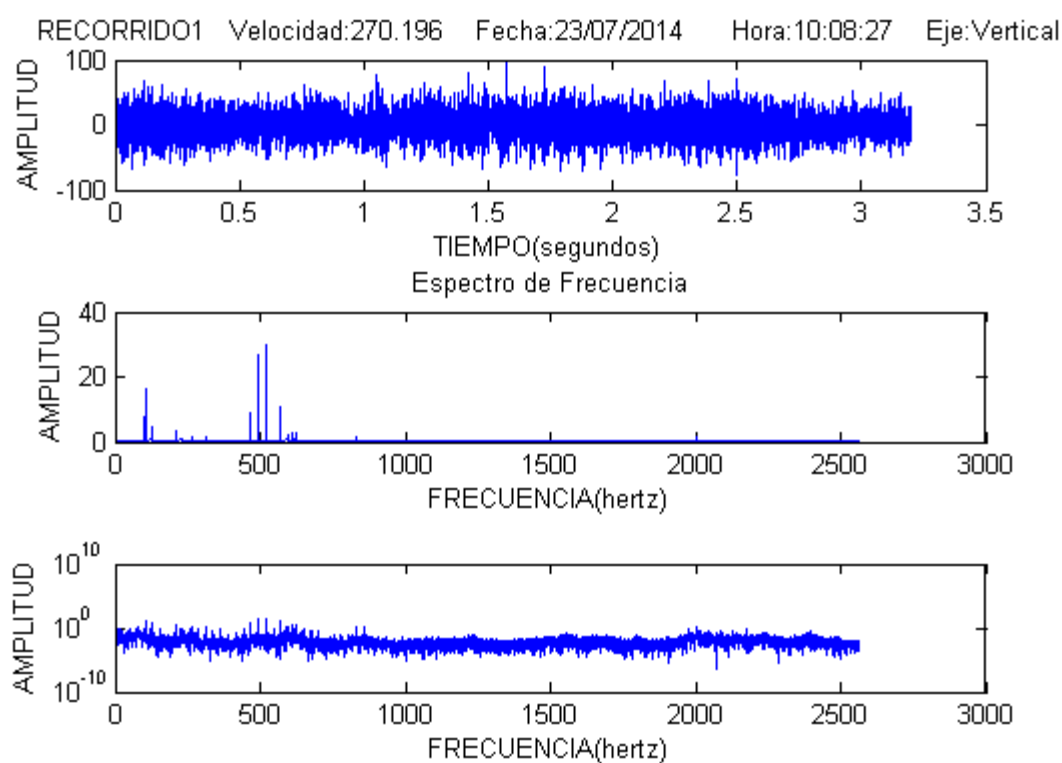
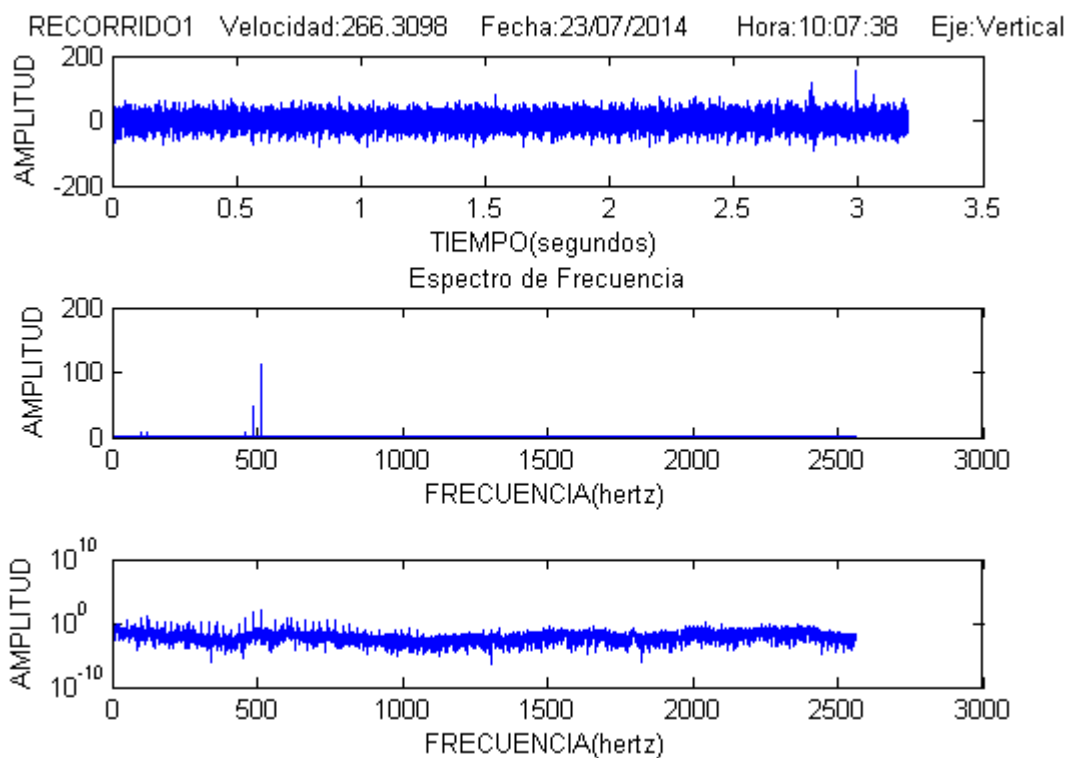


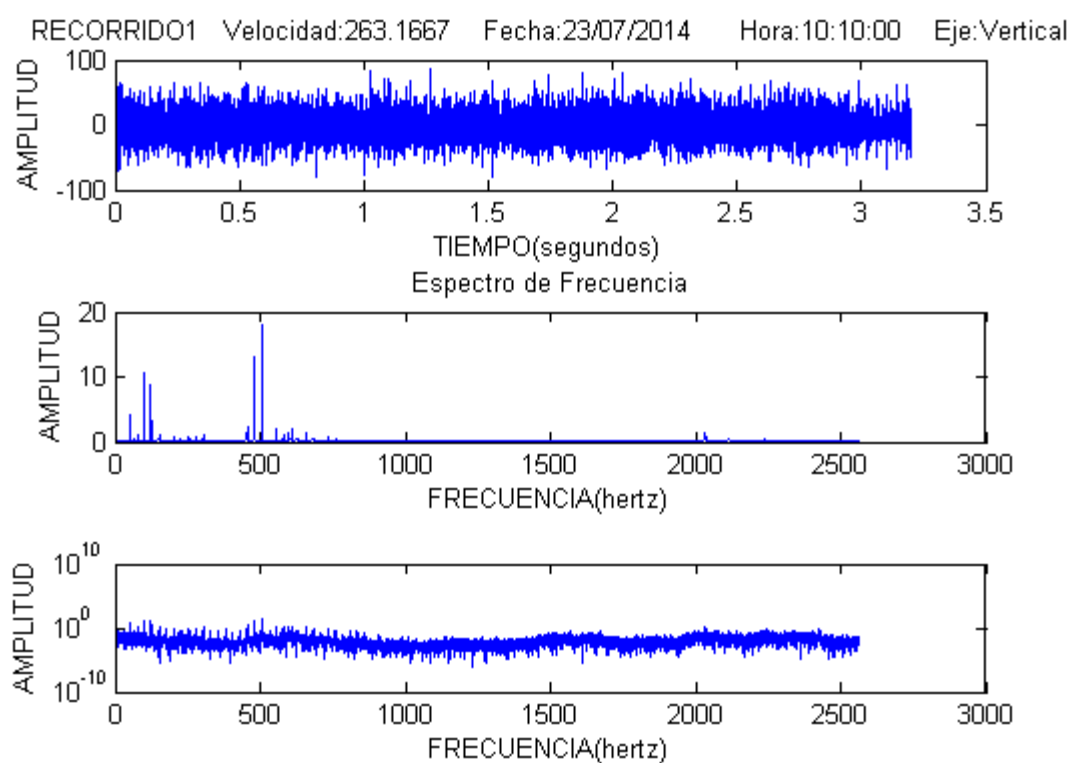
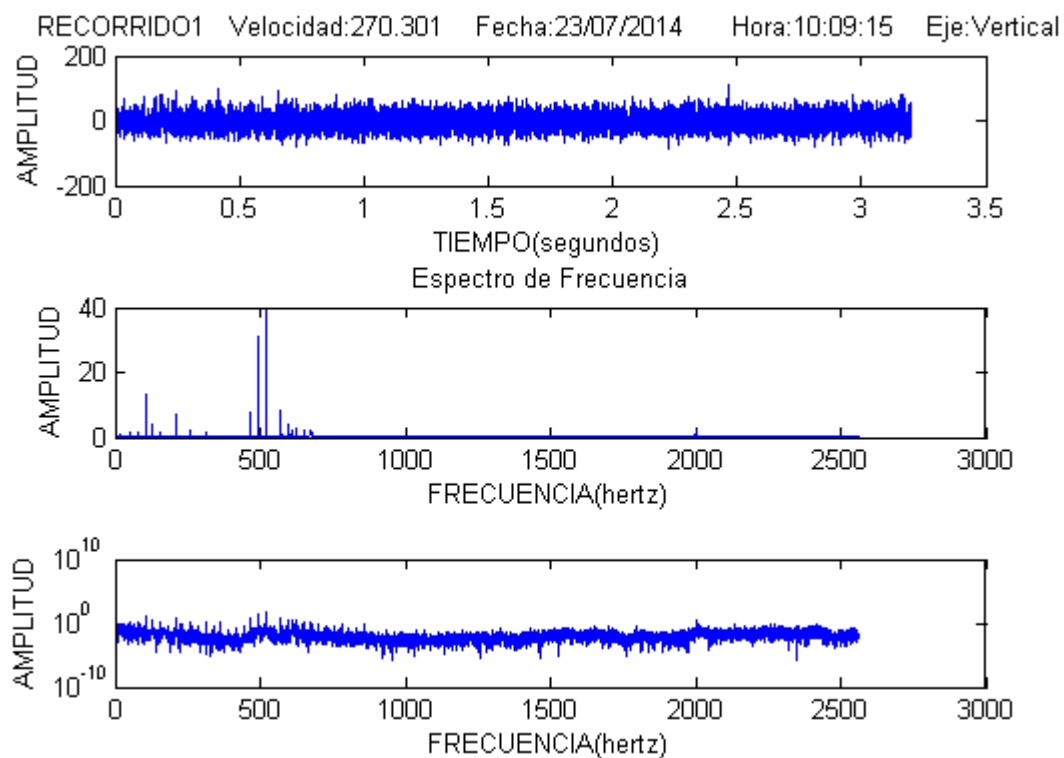


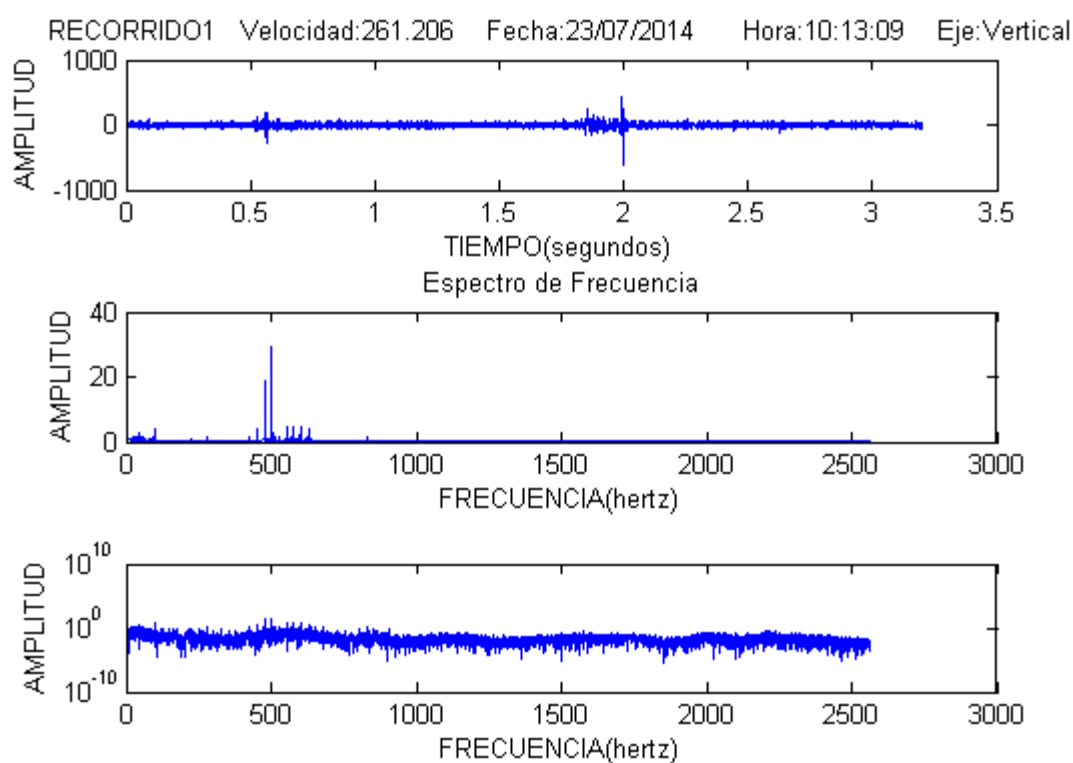
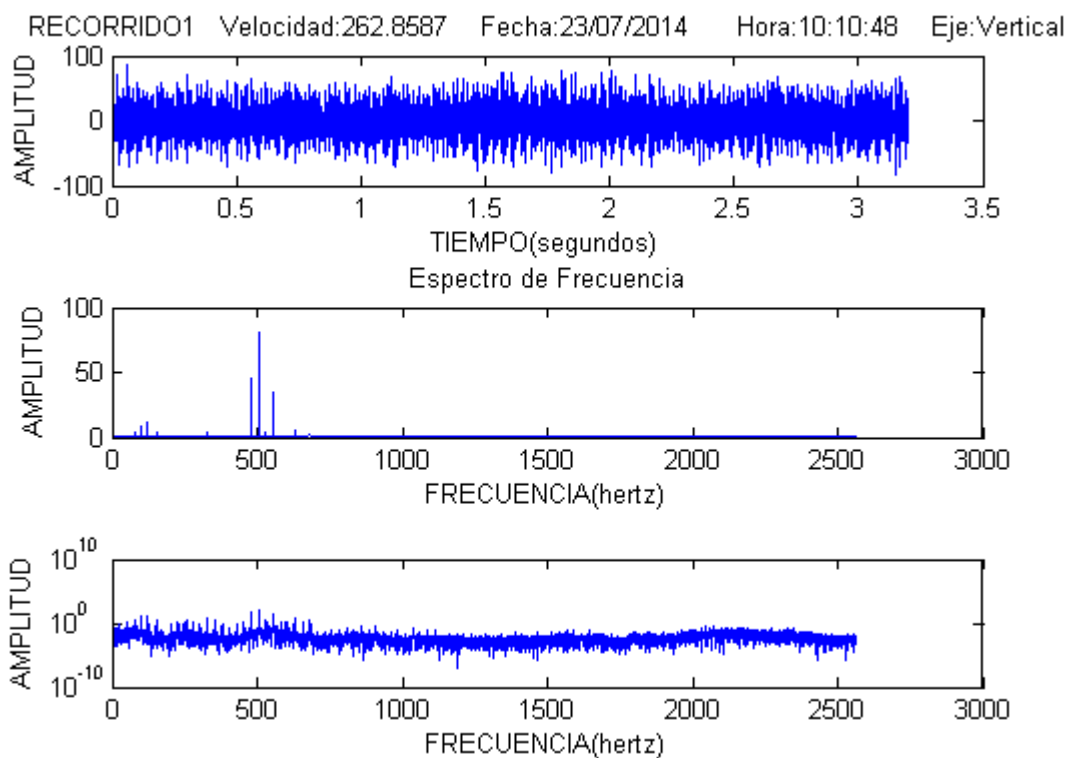


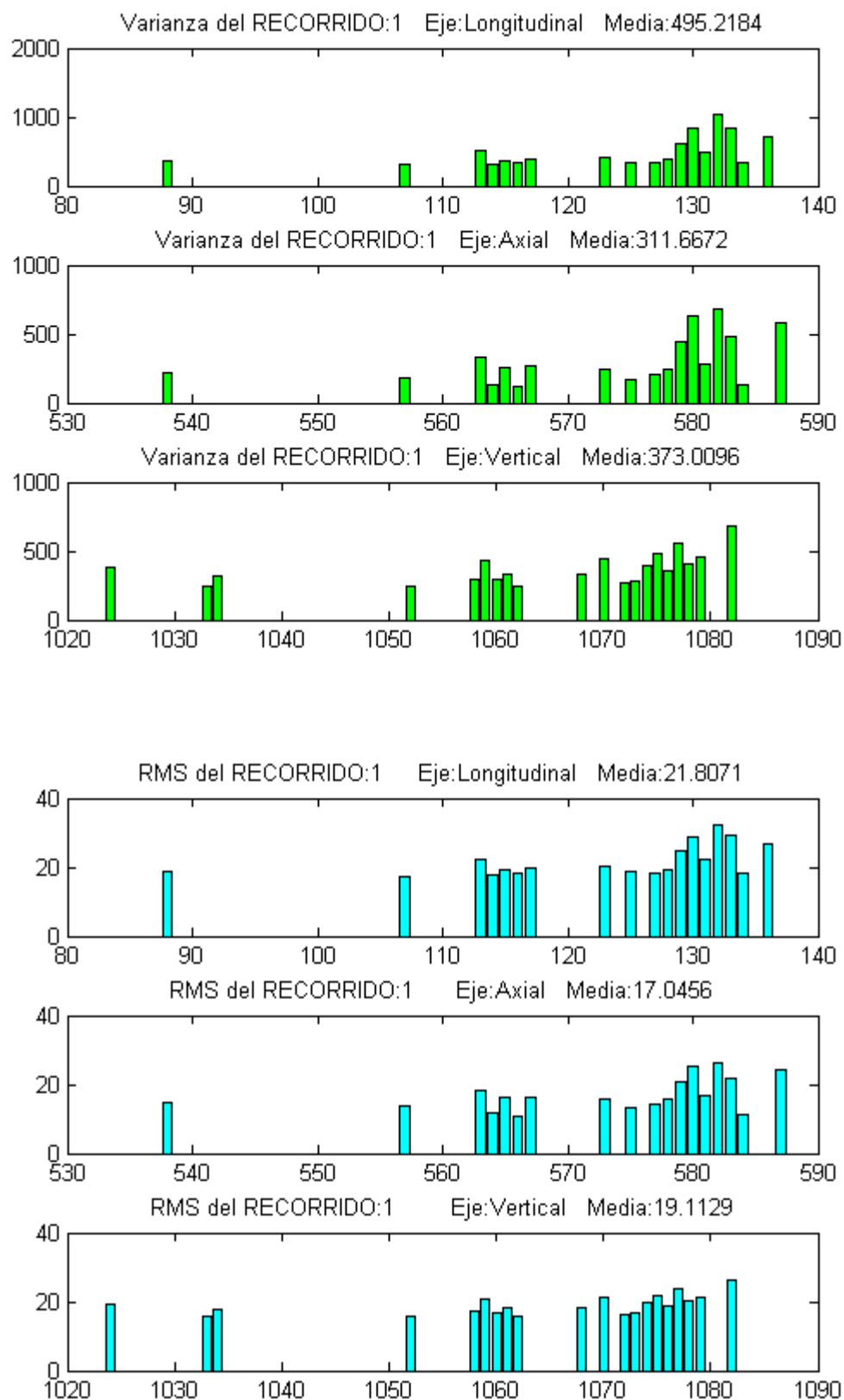


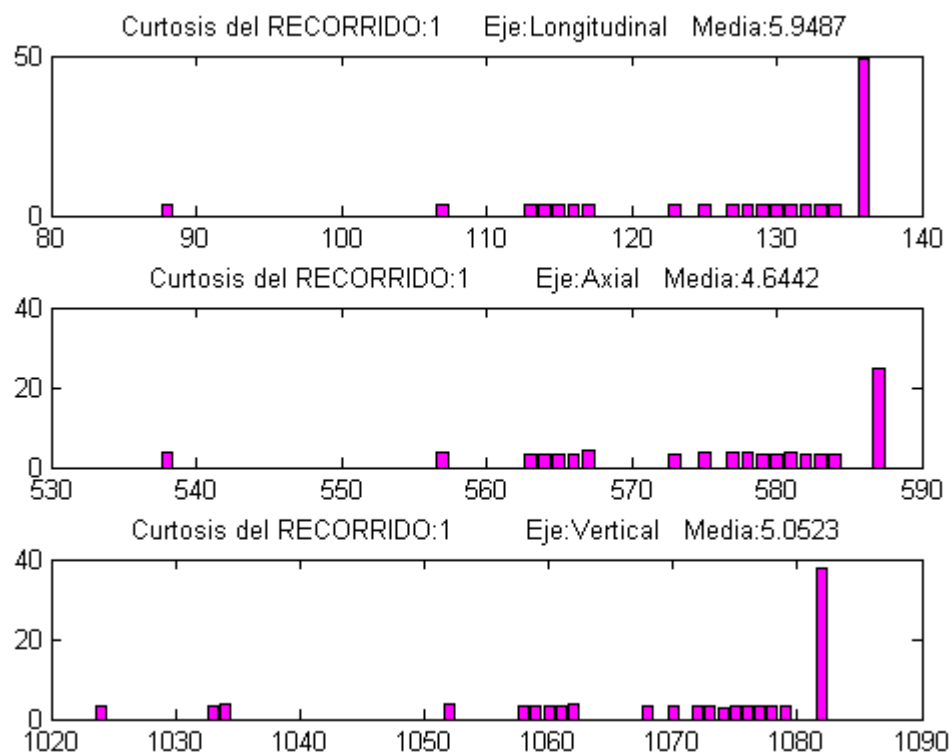




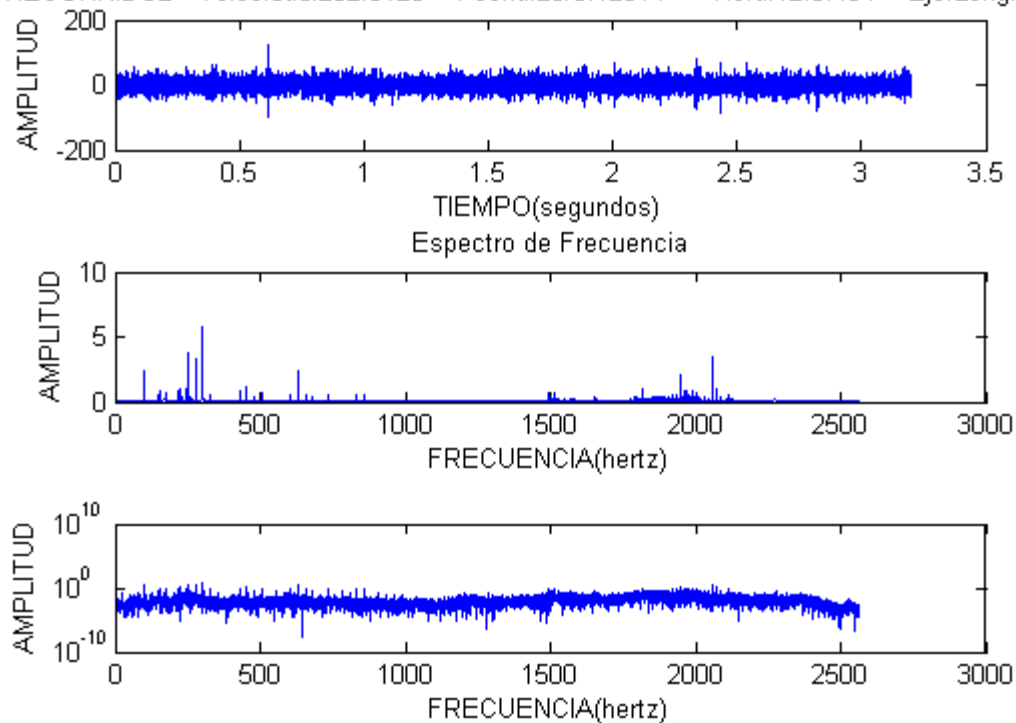




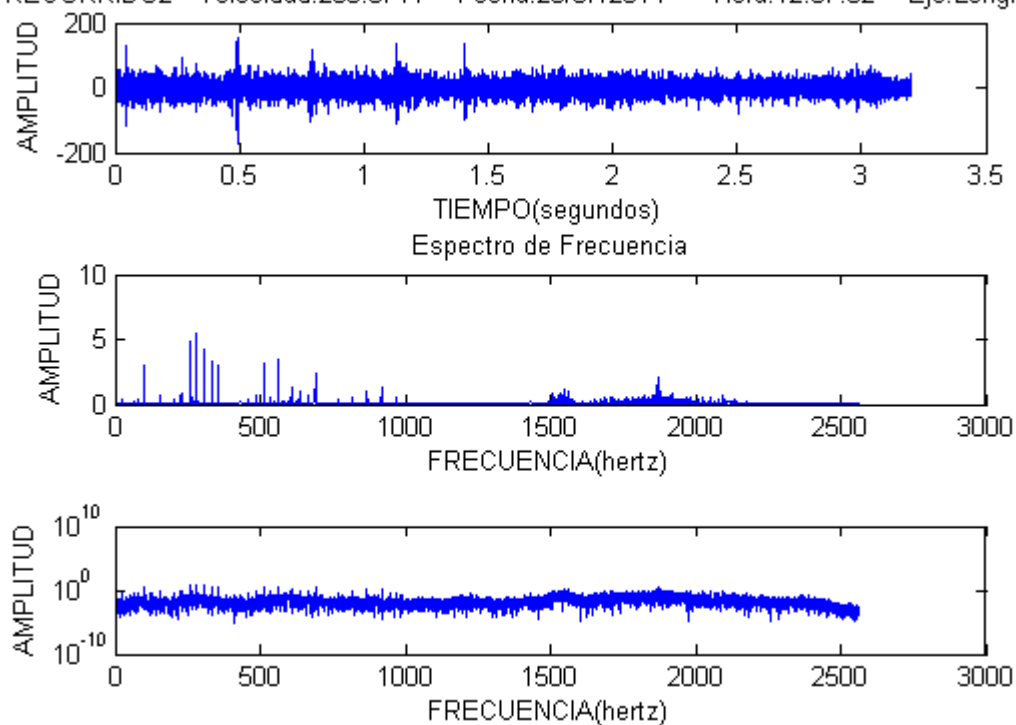




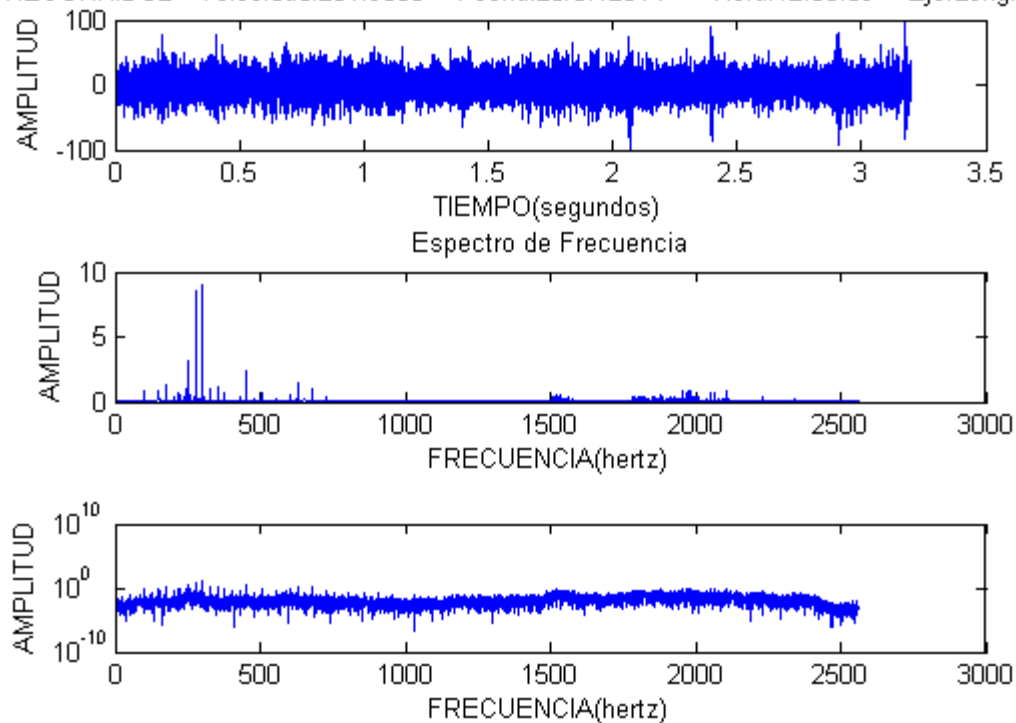
RECORRIDO2 Velocidad:262.6126 Fecha:23/07/2014 Hora:12:37:04 Eje:Longitudinal



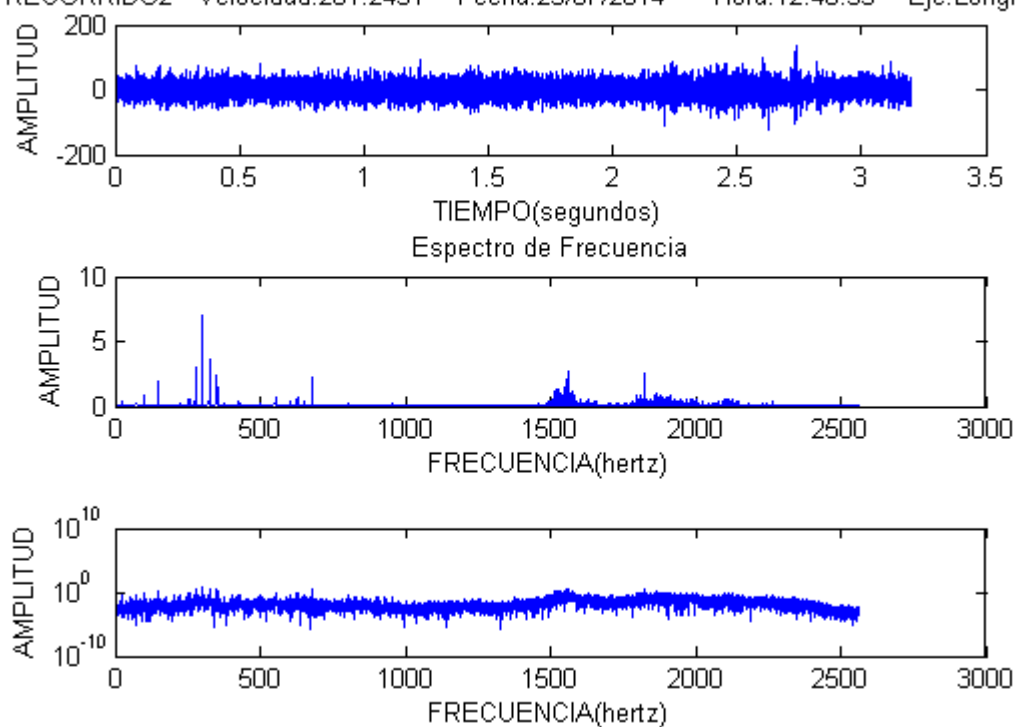
RECORRIDO2 Velocidad:265.6711 Fecha:23/07/2014 Hora:12:37:52 Eje:Longitudinal



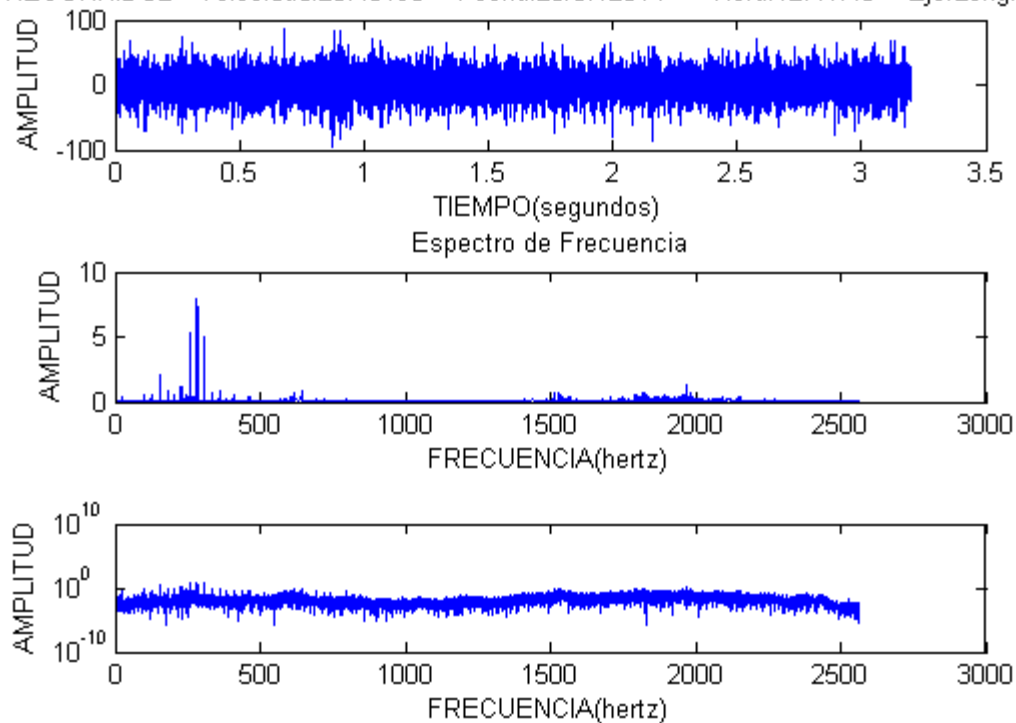
RECORRIDO2 Velocidad:261.9683 Fecha:23/07/2014 Hora:12:38:39 Eje:Longitudinal



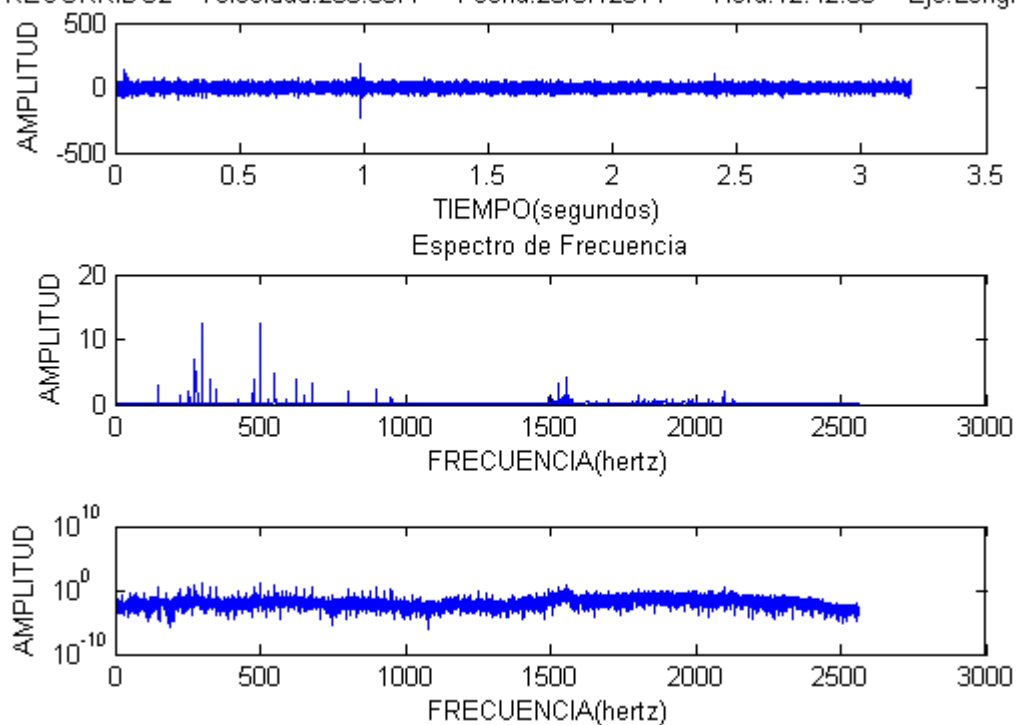
RECORRIDO2 Velocidad:261.2431 Fecha:23/07/2014 Hora:12:40:55 Eje:Longitudinal



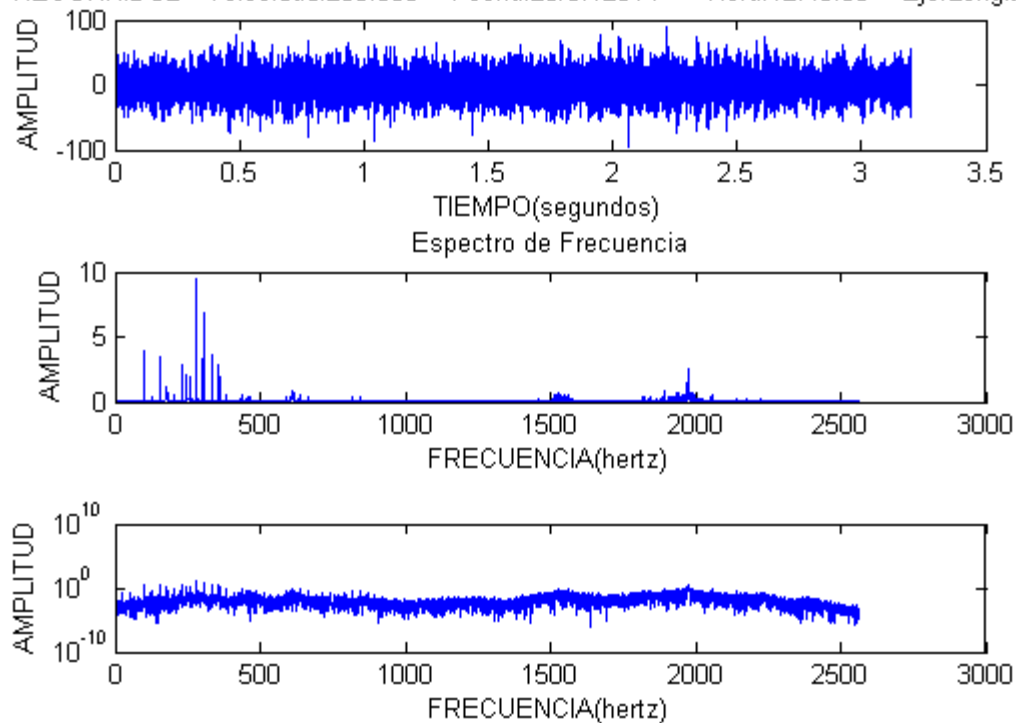
RECORRIDO2 Velocidad:267.0196 Fecha:23/07/2014 Hora:12:41:43 Eje:Longitudinal



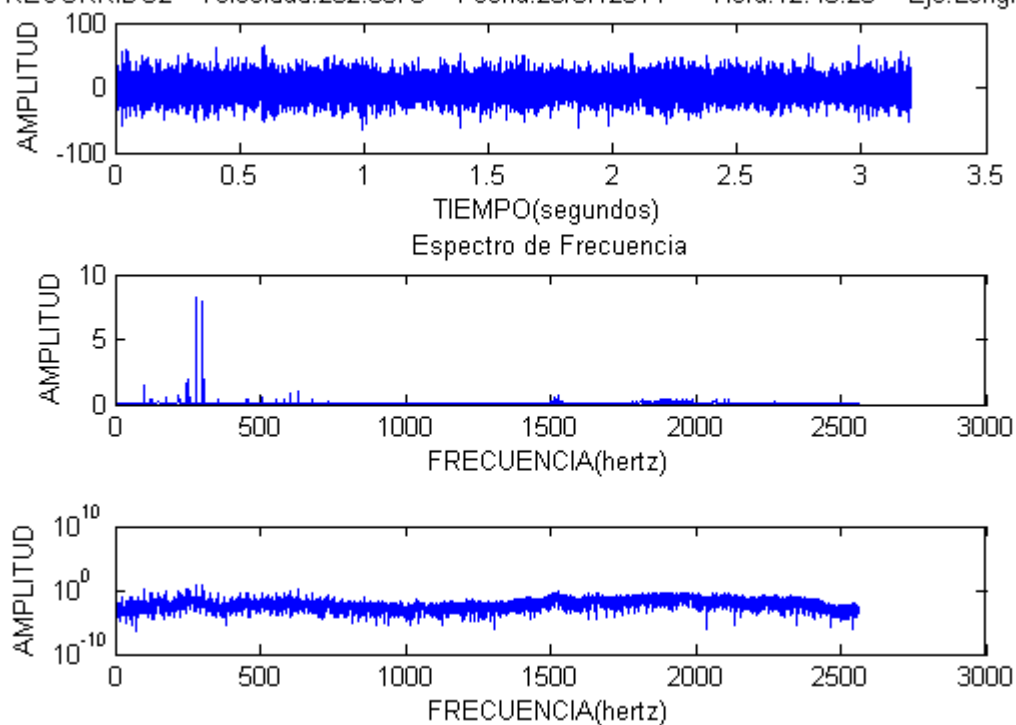
RECORRIDO2 Velocidad:260.5077 Fecha:23/07/2014 Hora:12:42:30 Eje:Longitudinal



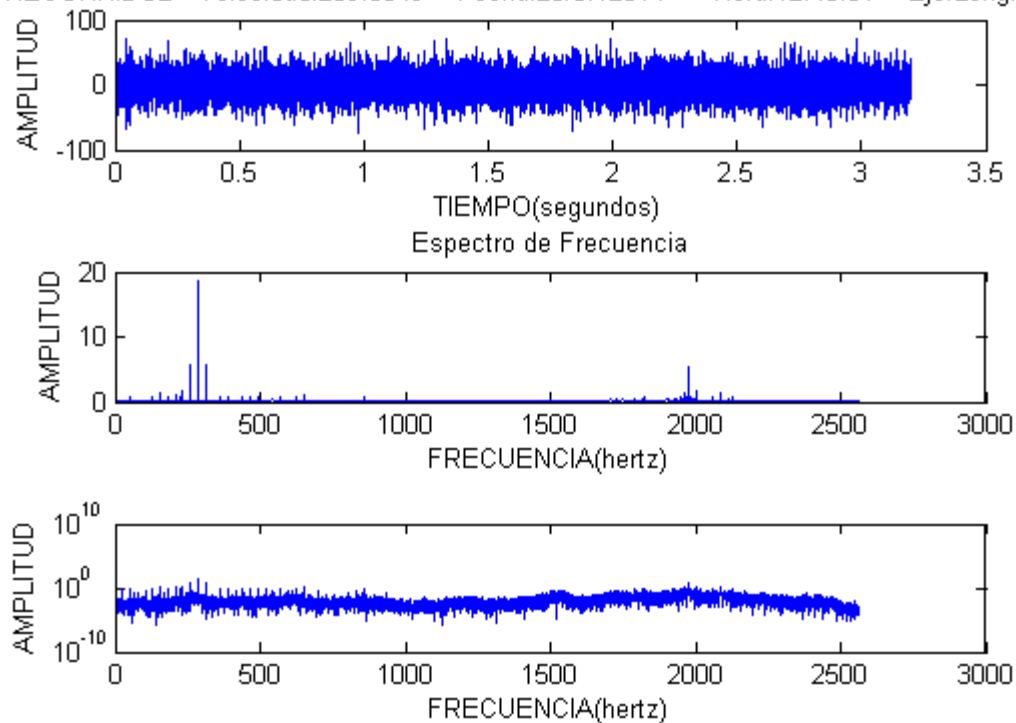
RECORRIDO2 Velocidad:265.865 Fecha:23/07/2014 Hora:12:45:36 Eje:Longitudinal



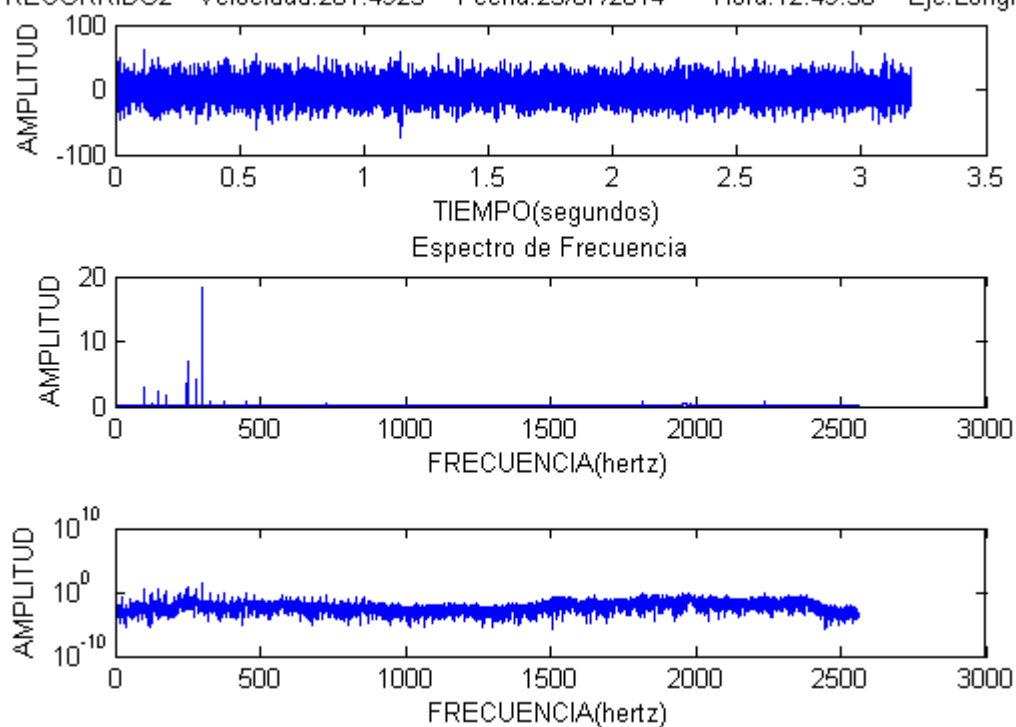
RECORRIDO2 Velocidad:262.5573 Fecha:23/07/2014 Hora:12:46:25 Eje:Longitudinal



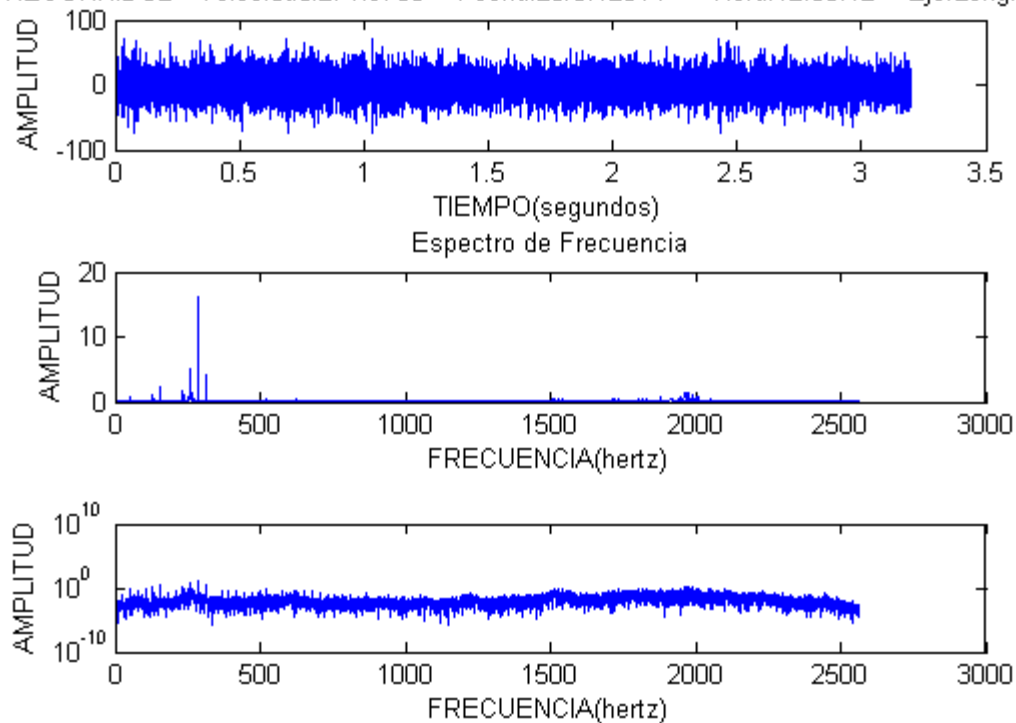
RECORRIDO2 Velocidad:269.8849 Fecha:23/07/2014 Hora:12:48:01 Eje:Longitudinal



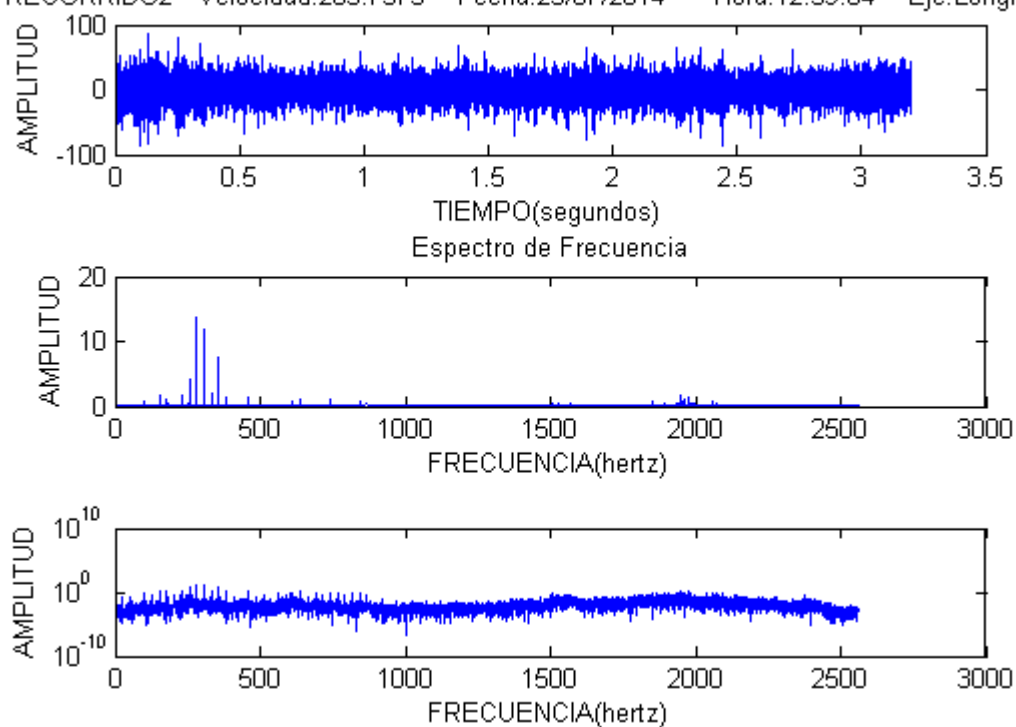
RECORRIDO2 Velocidad:261.4925 Fecha:23/07/2014 Hora:12:49:38 Eje:Longitudinal



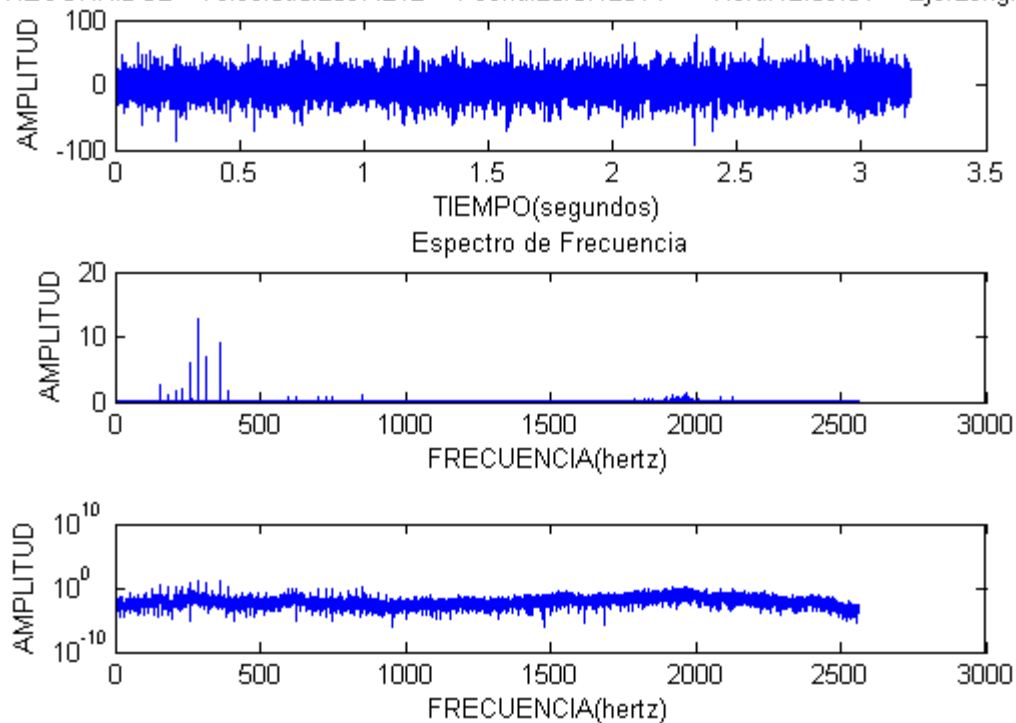
RECORRIDO2 Velocidad:271.9768 Fecha:23/07/2014 Hora:12:55:12 Eje:Longitudinal



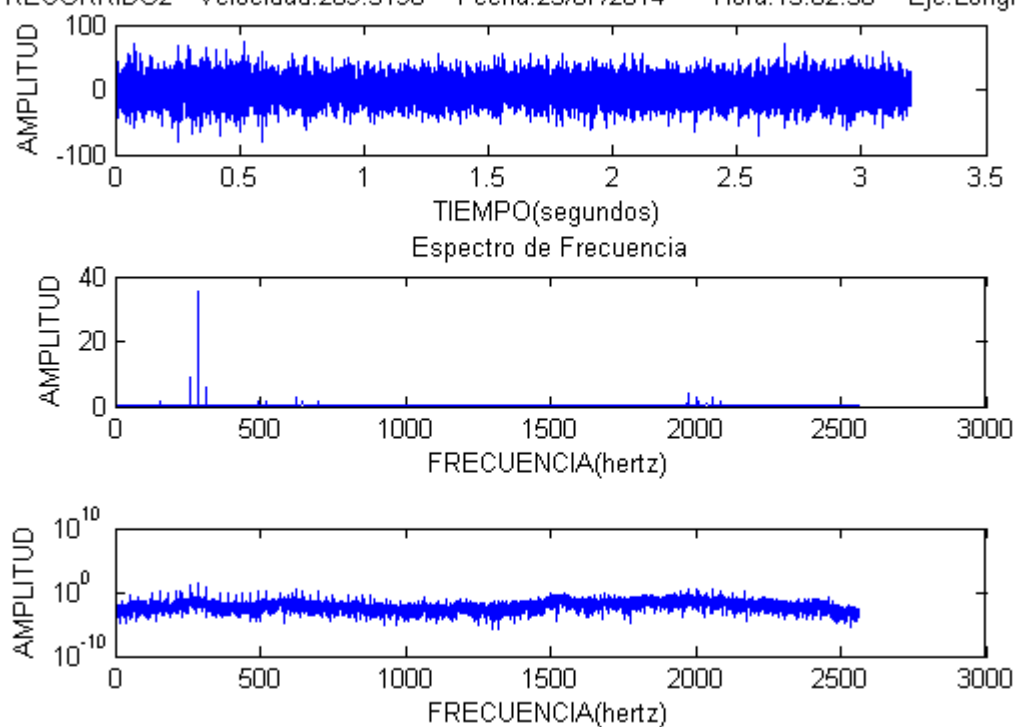
RECORRIDO2 Velocidad:265.7375 Fecha:23/07/2014 Hora:12:59:04 Eje:Longitudinal



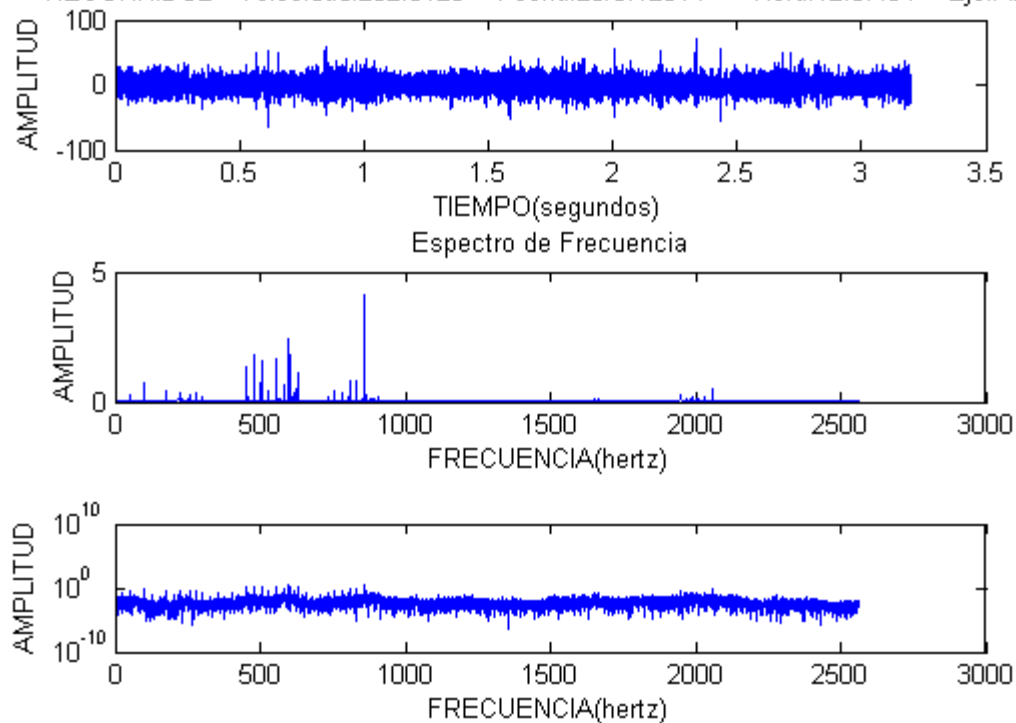
RECORRIDO2 Velocidad:269.4212 Fecha:23/07/2014 Hora:12:59:51 Eje:Longitudinal

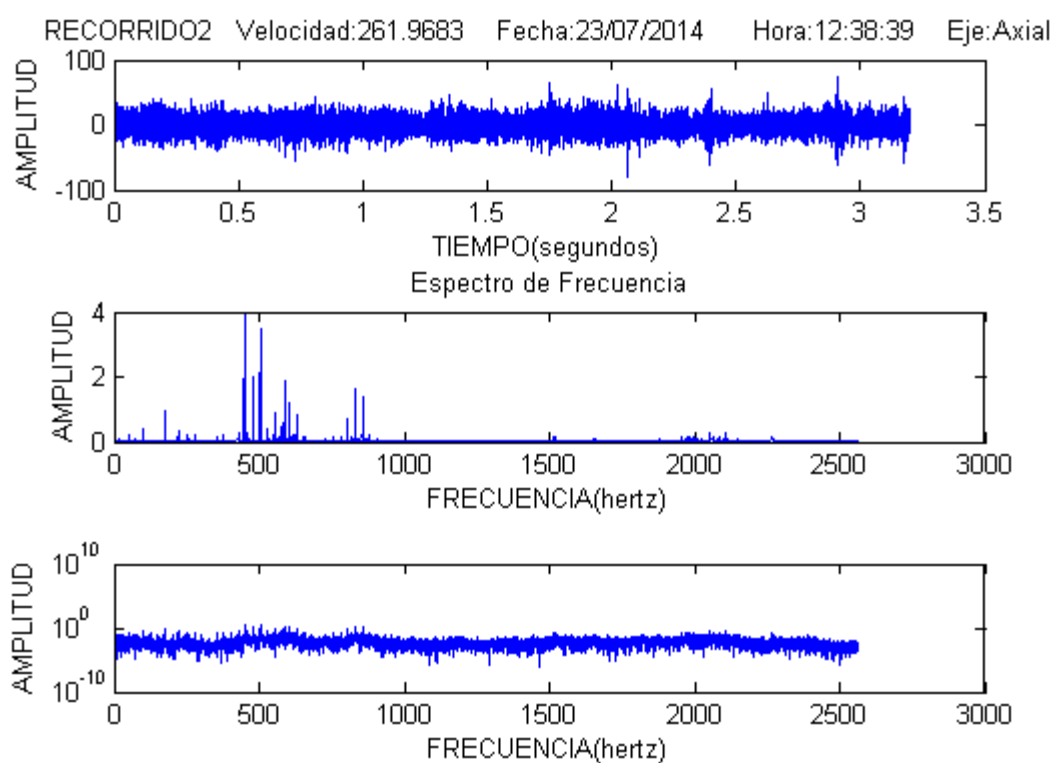
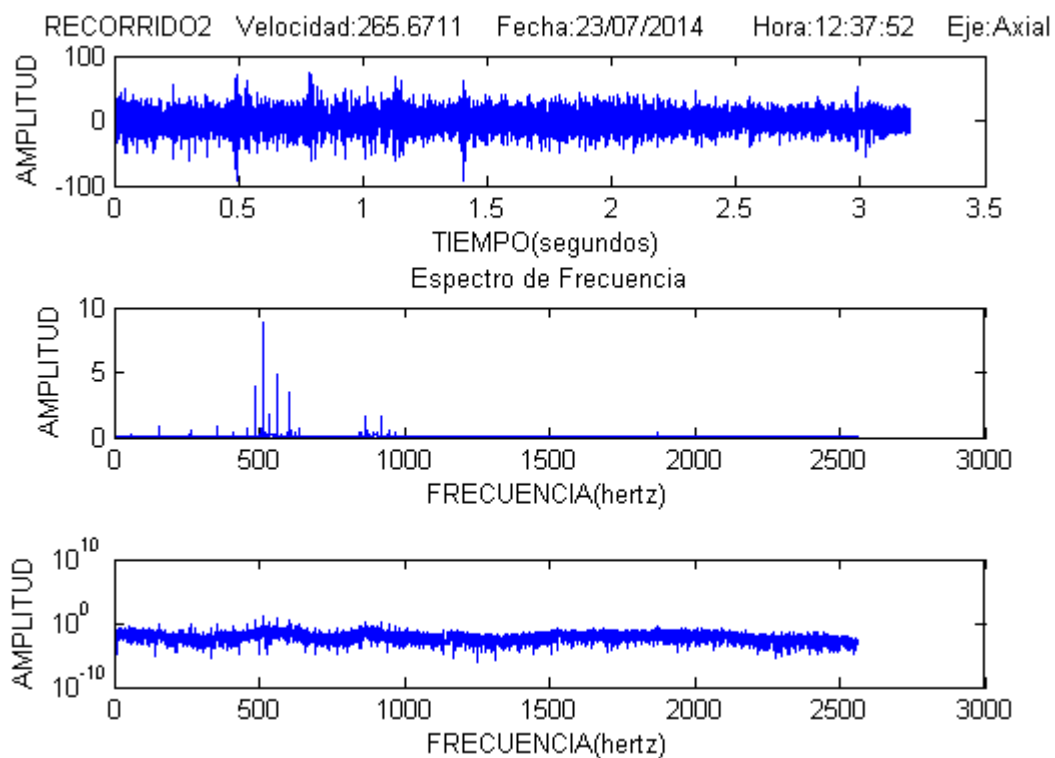


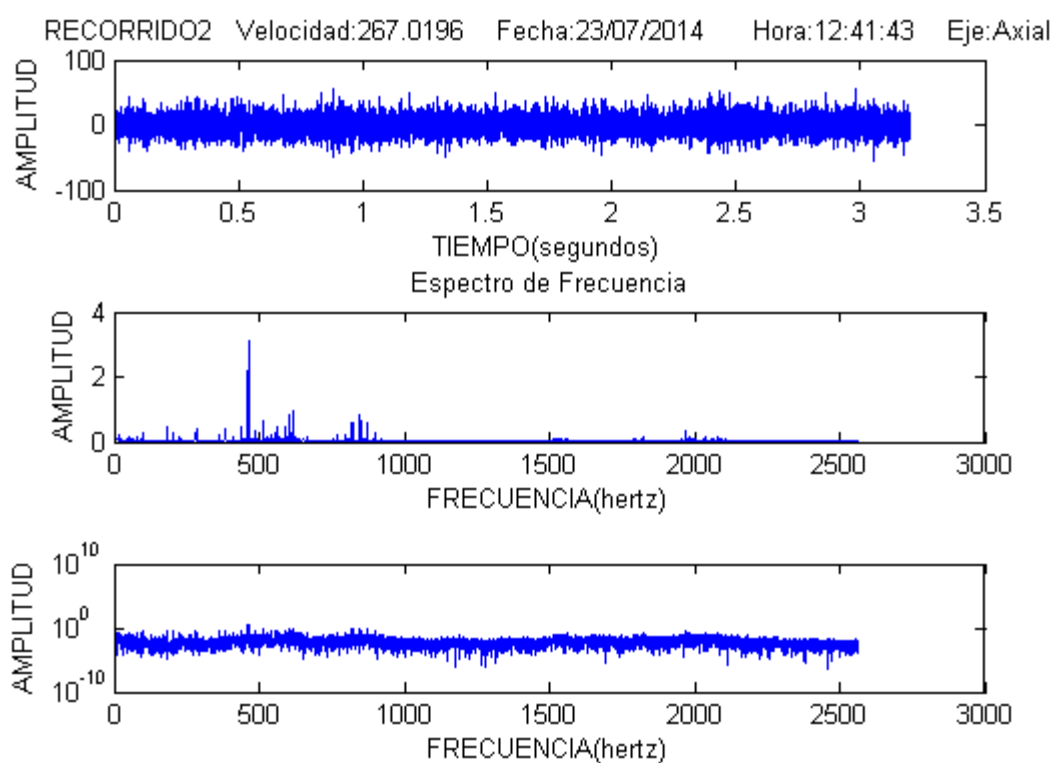
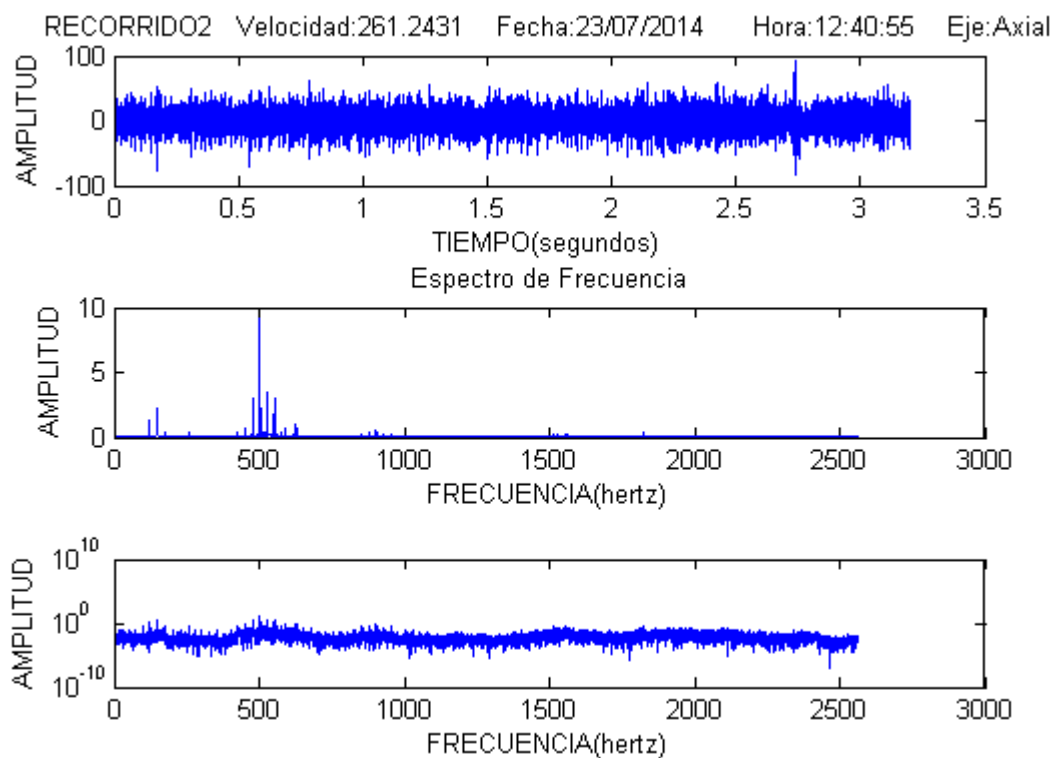
RECORRIDO2 Velocidad:269.5196 Fecha:23/07/2014 Hora:13:02:56 Eje:Longitudinal

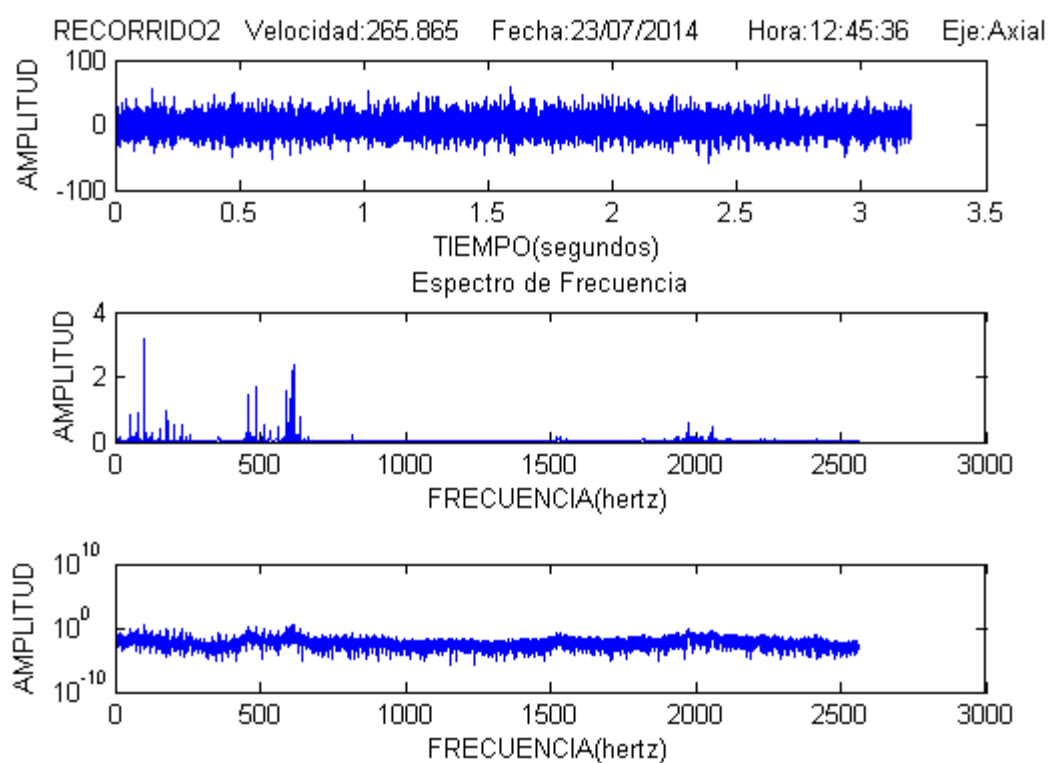
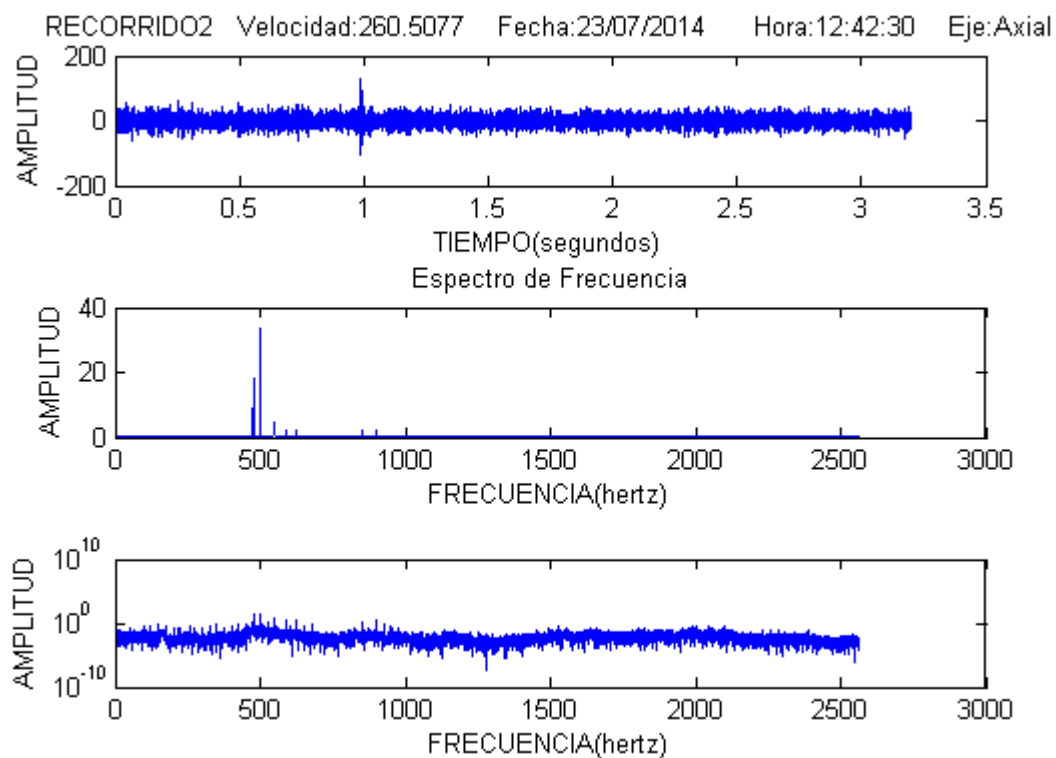


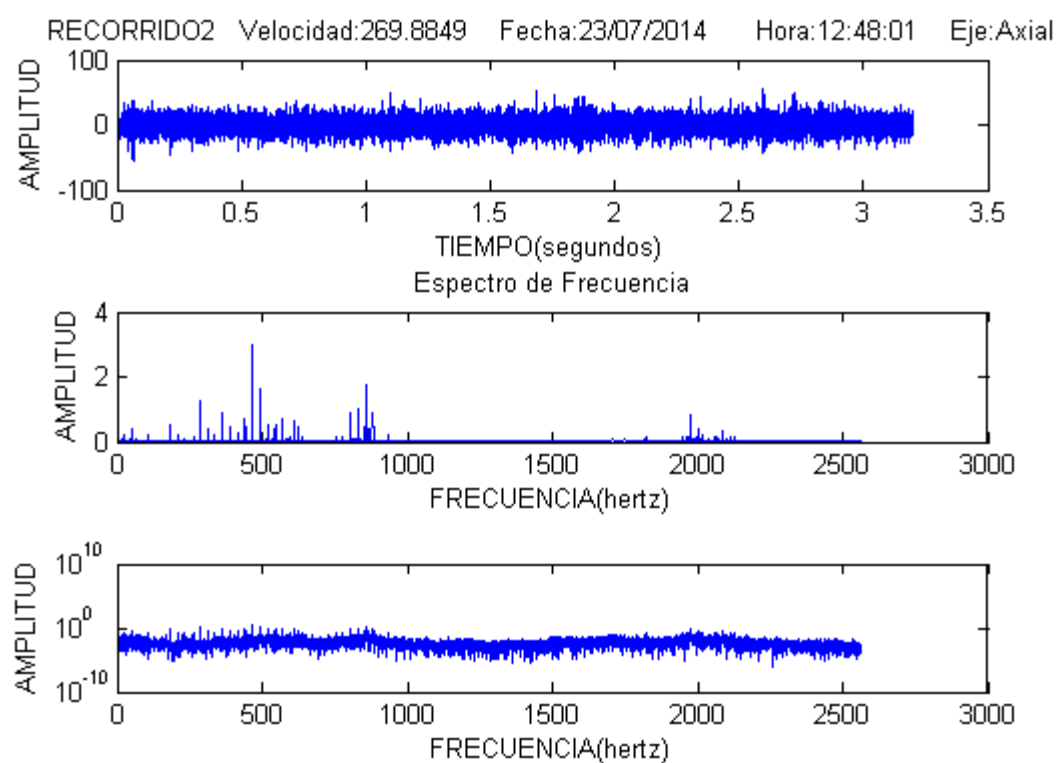
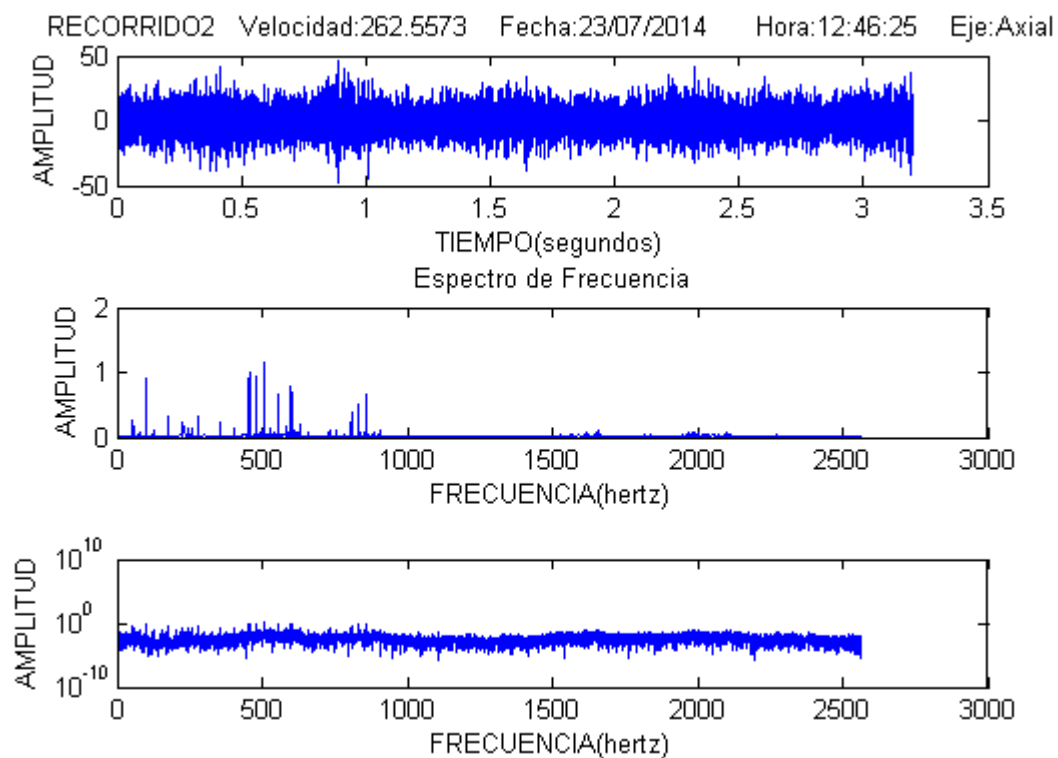
RECORRIDO2 Velocidad:262.6126 Fecha:23/07/2014 Hora:12:37:04 Eje:Axial



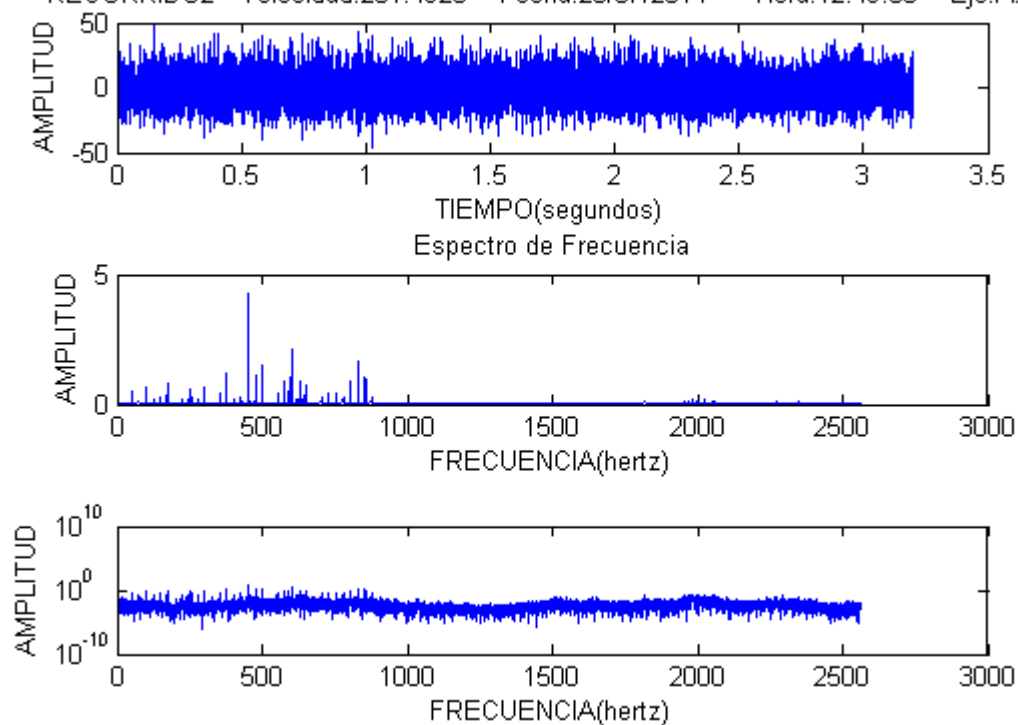




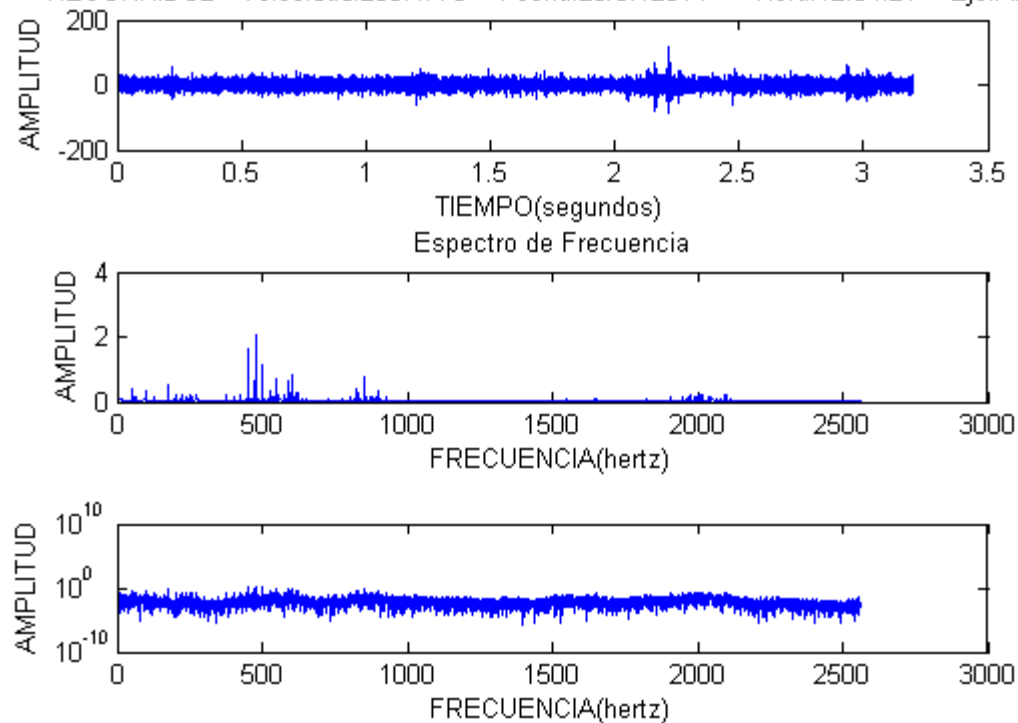


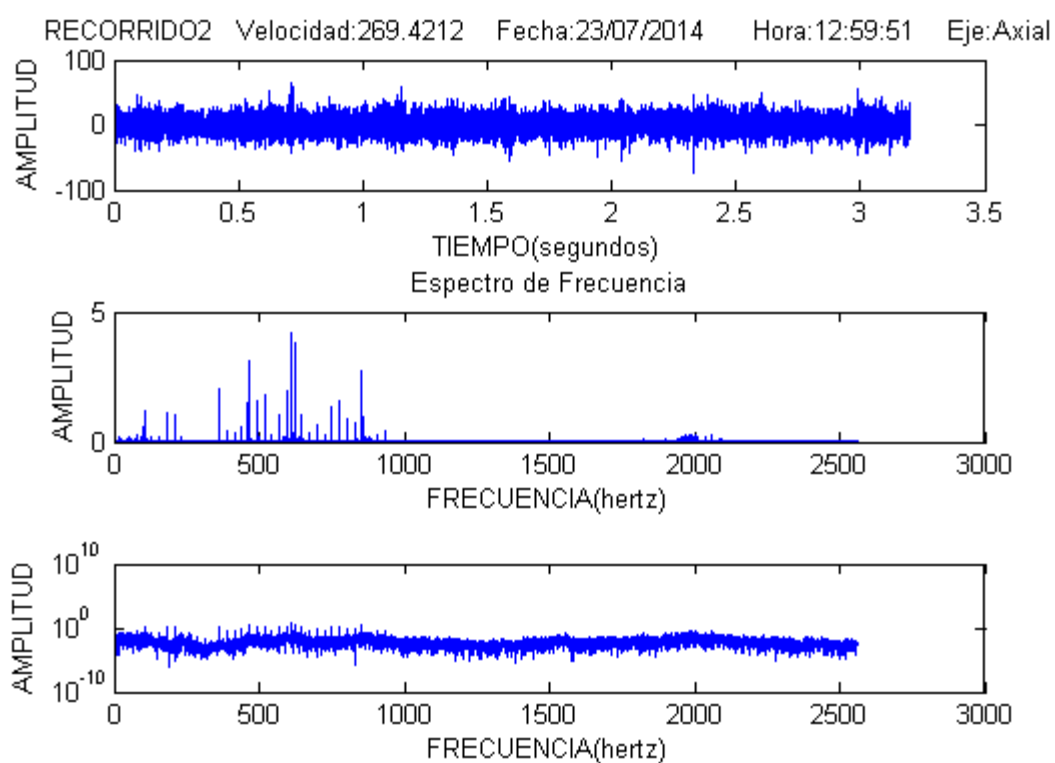
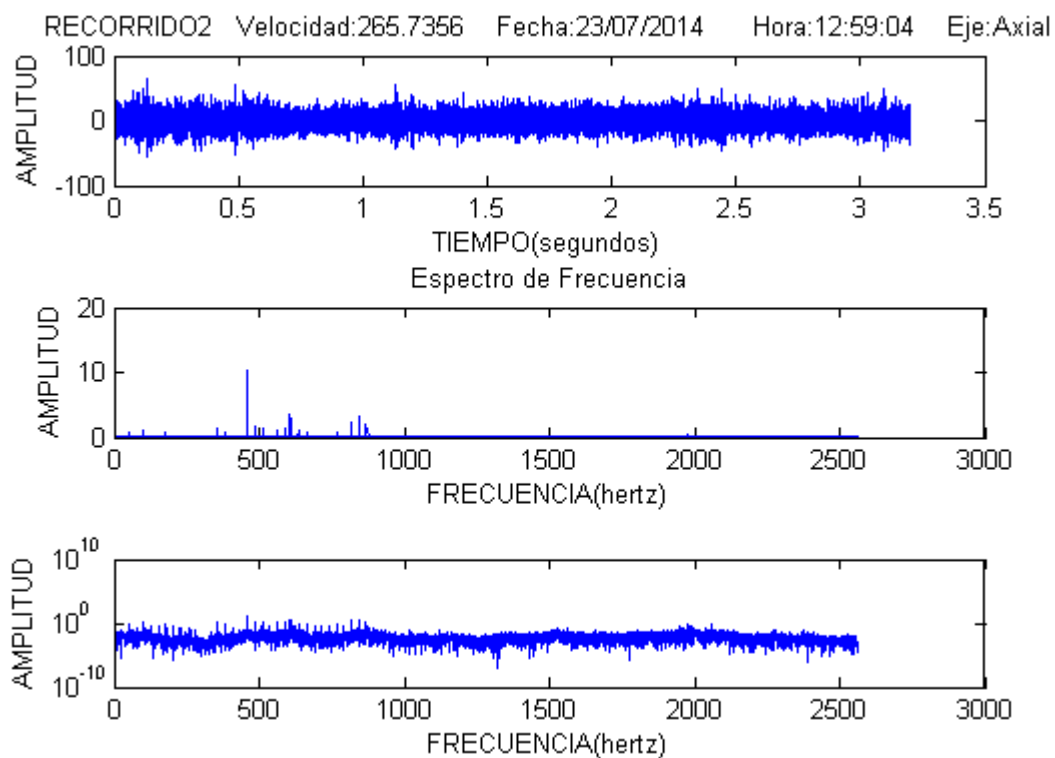


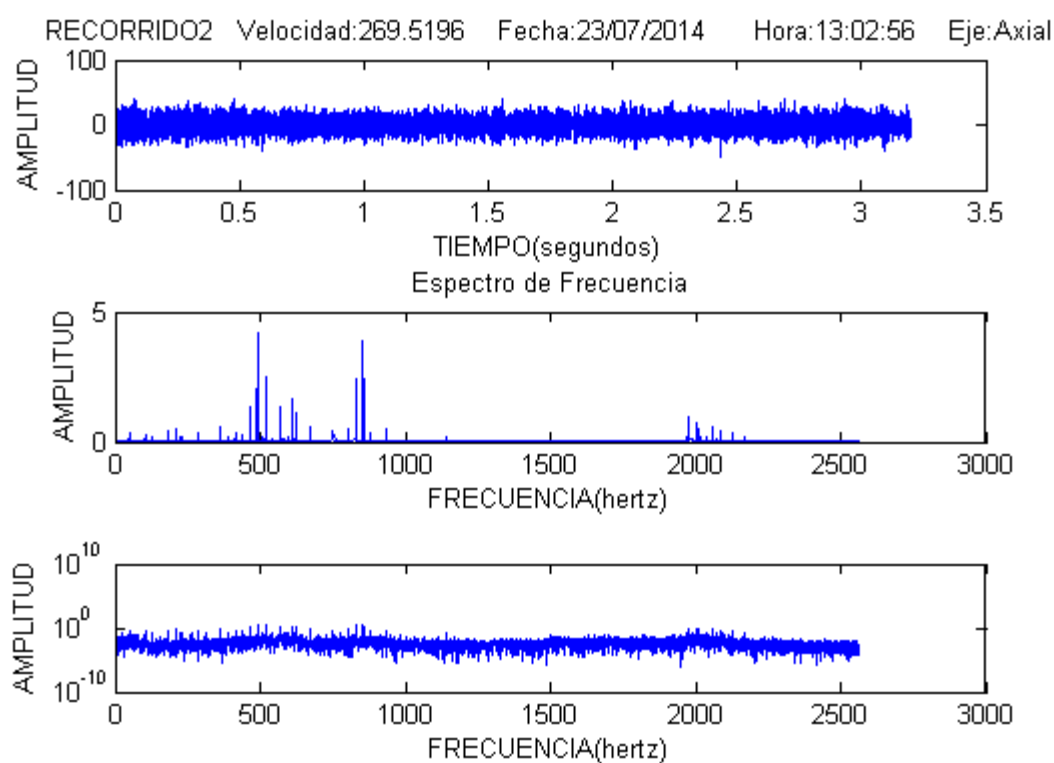
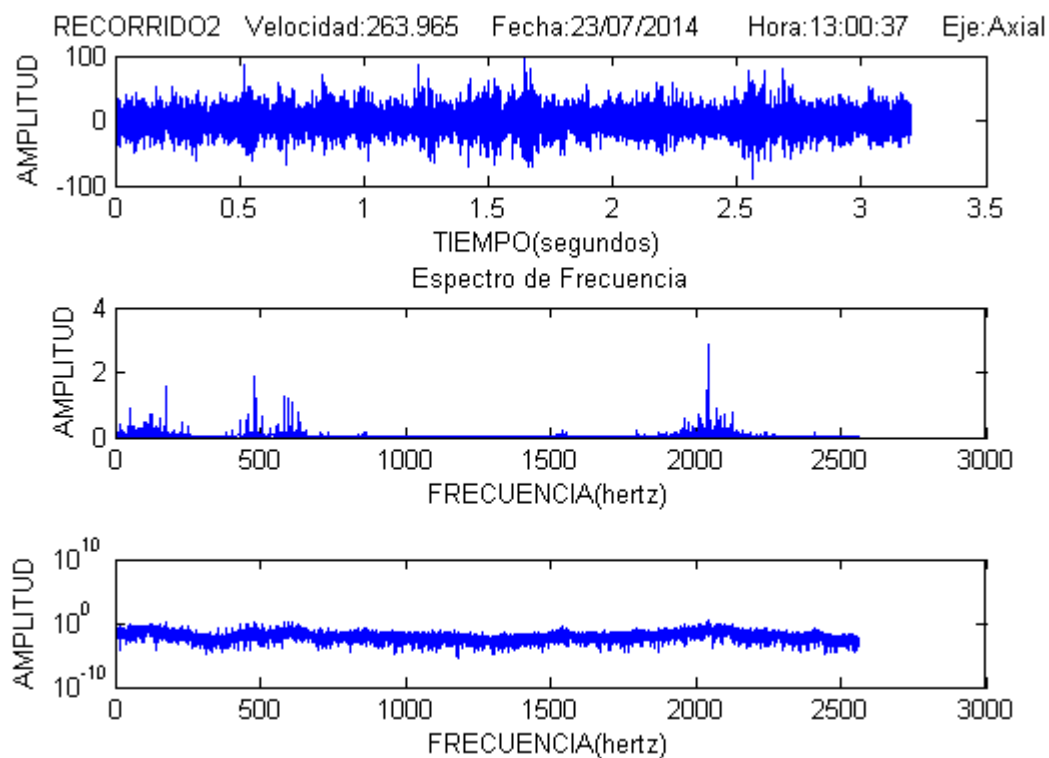
RECORRIDO2 Velocidad:261.4925 Fecha:23/07/2014 Hora:12:49:38 Eje:Axial

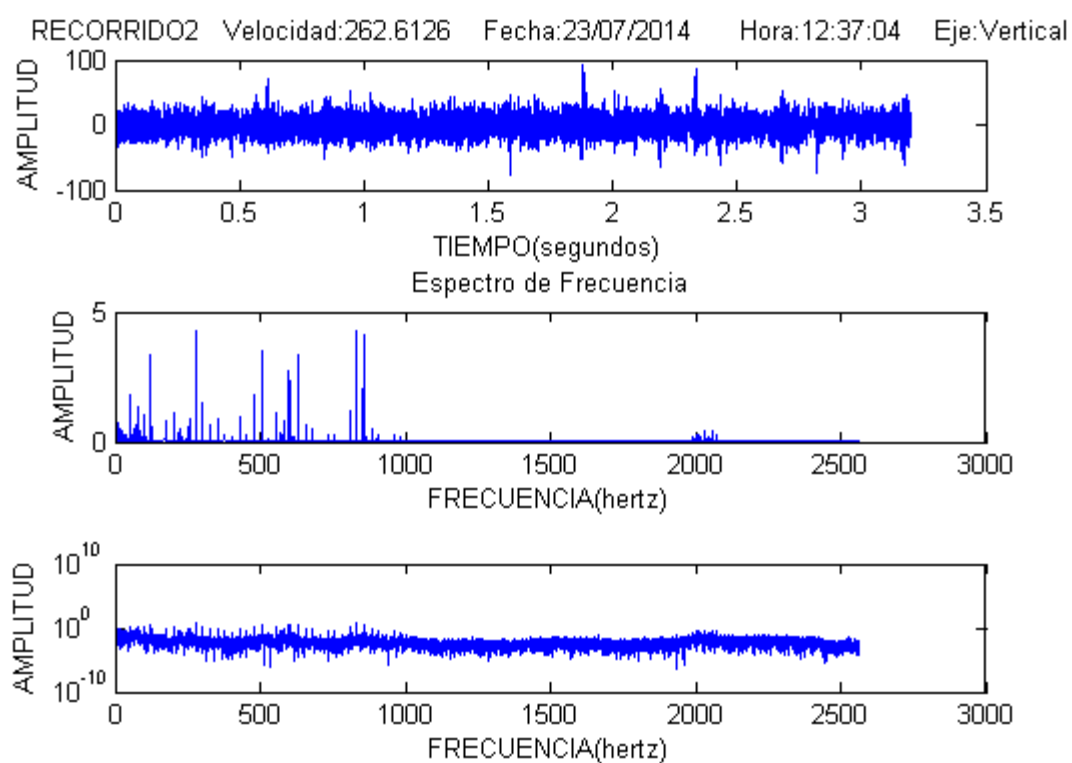
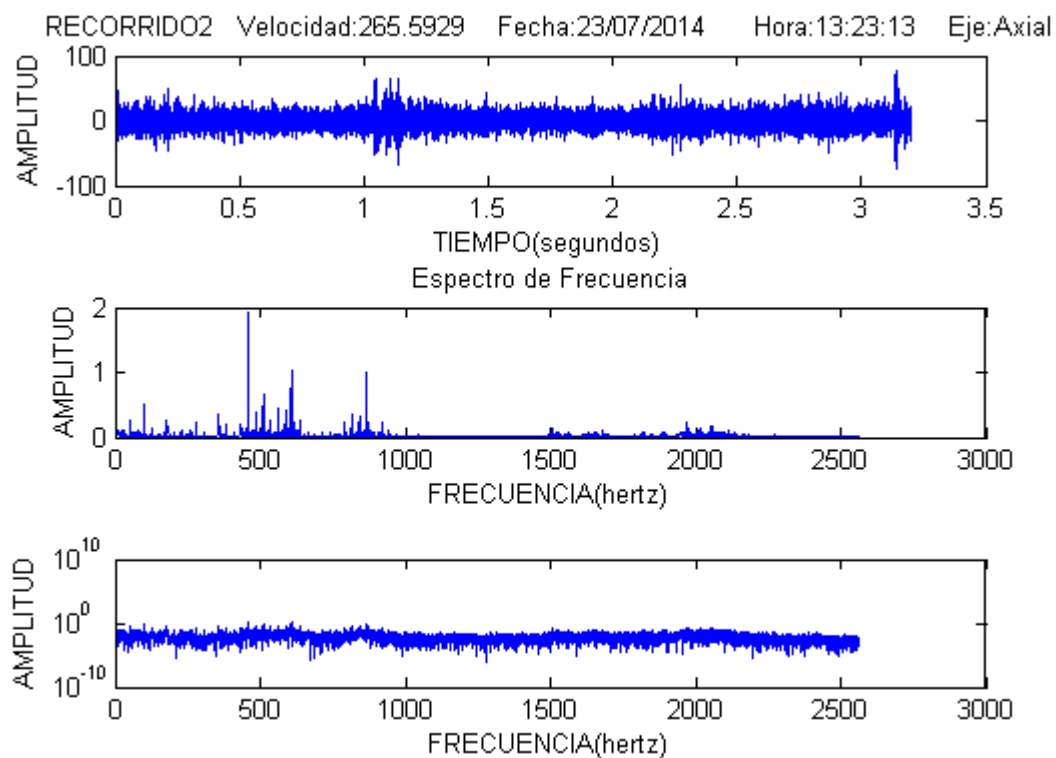


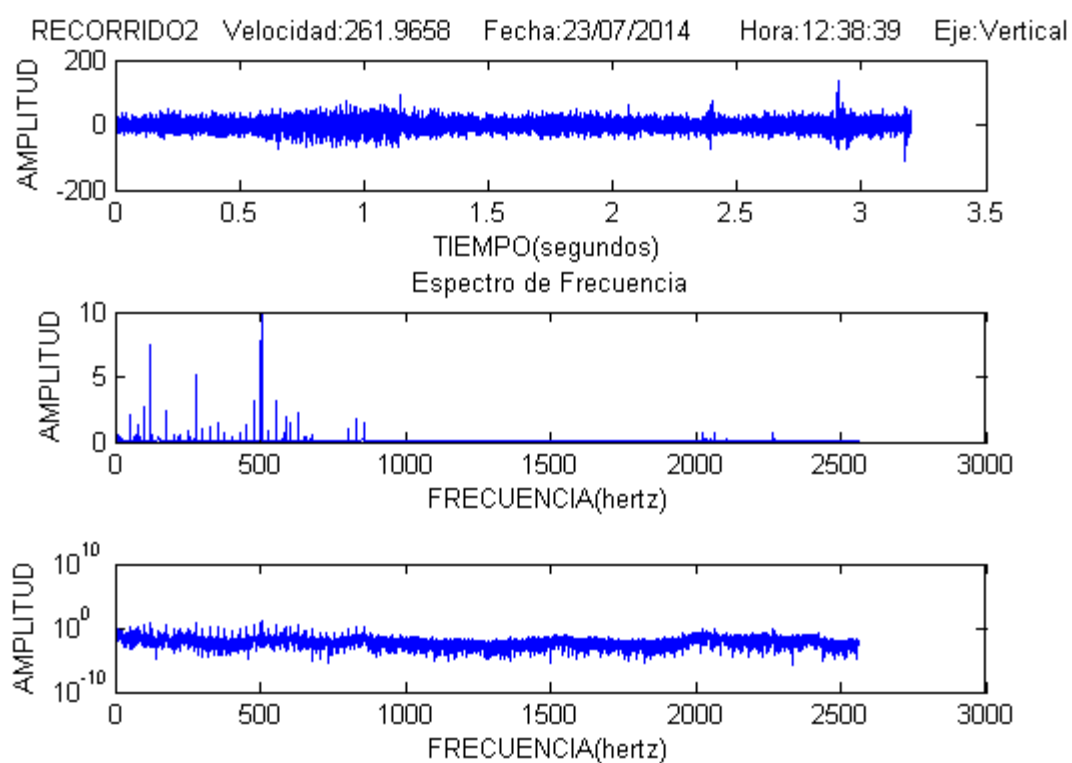
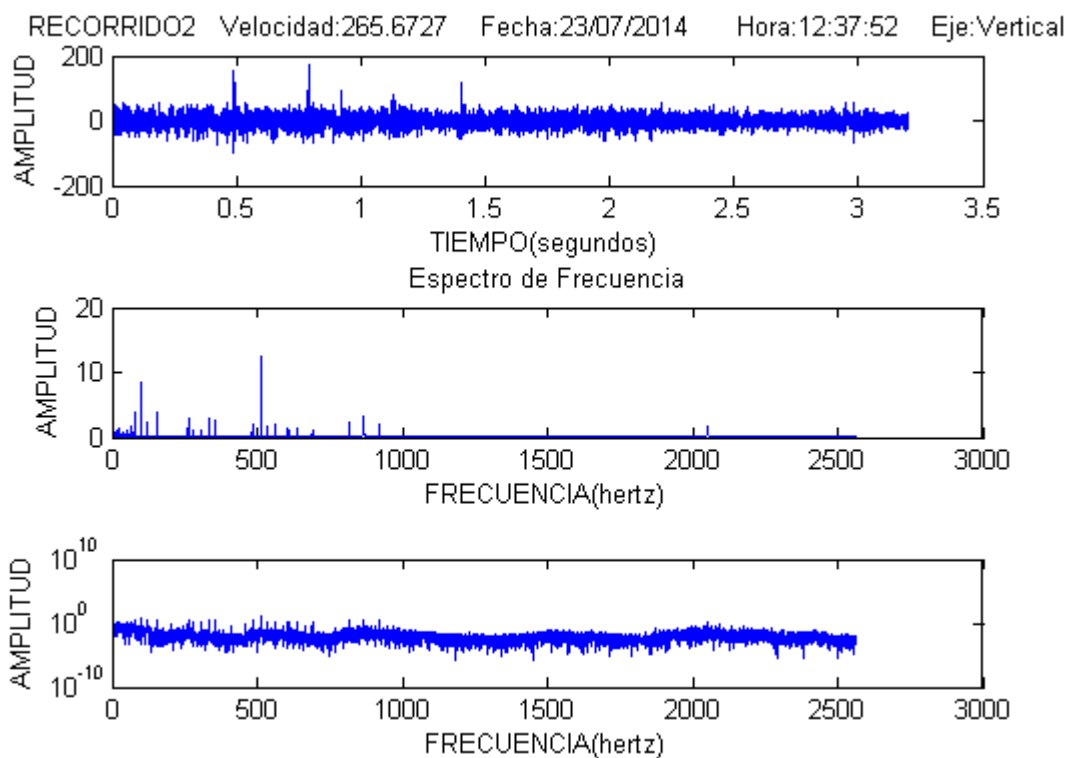
RECORRIDO2 Velocidad:260.4778 Fecha:23/07/2014 Hora:12:54:21 Eje:Axial

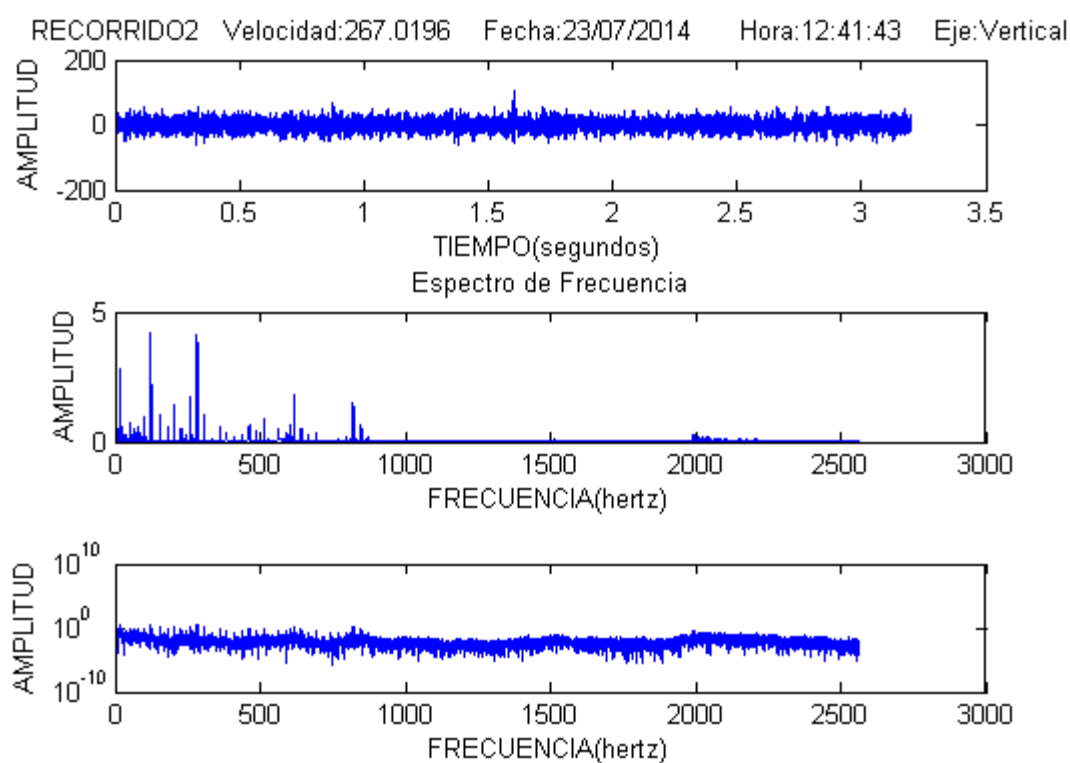
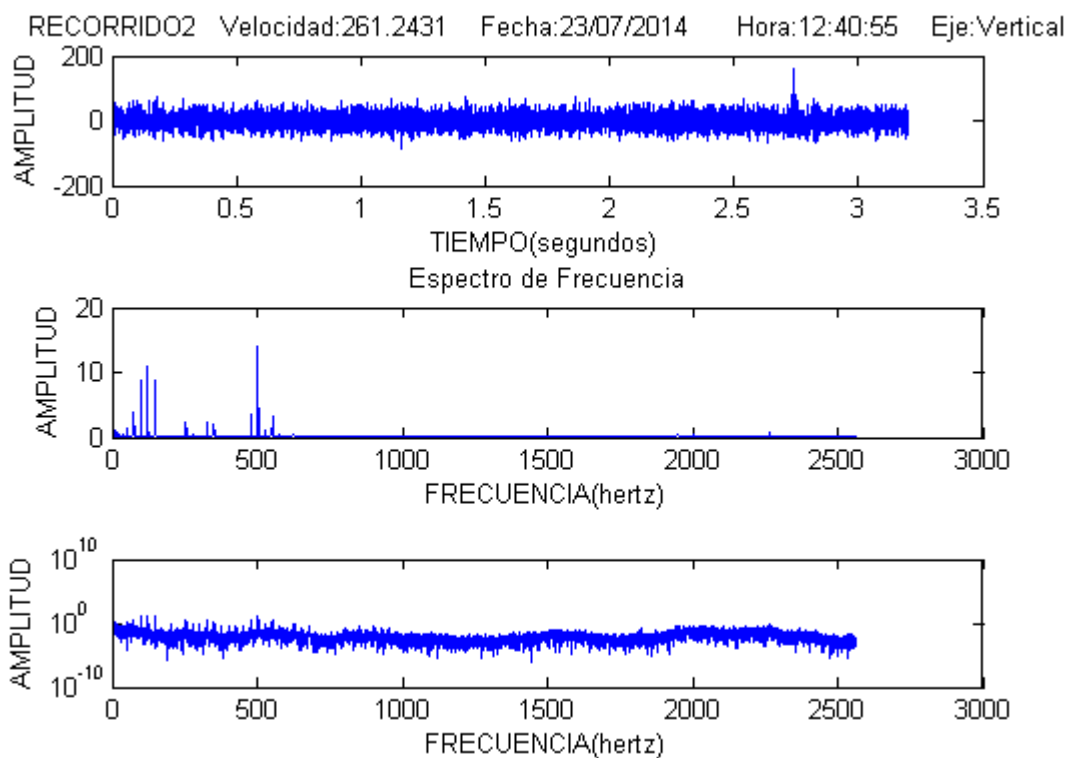


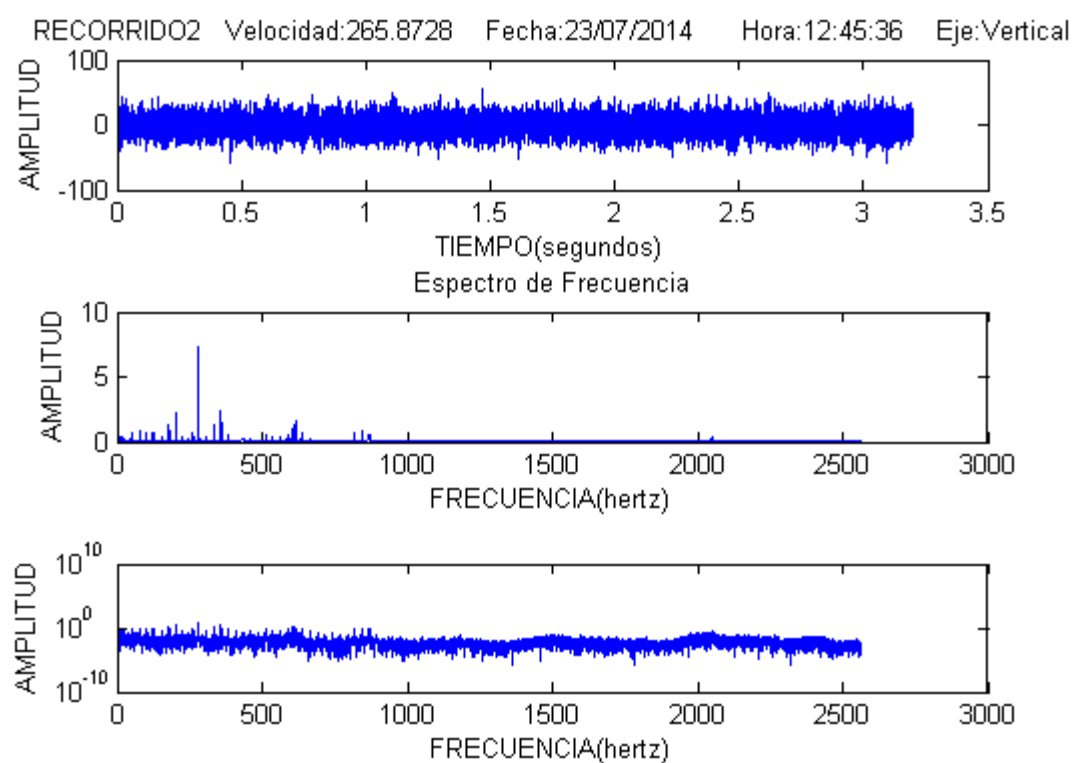
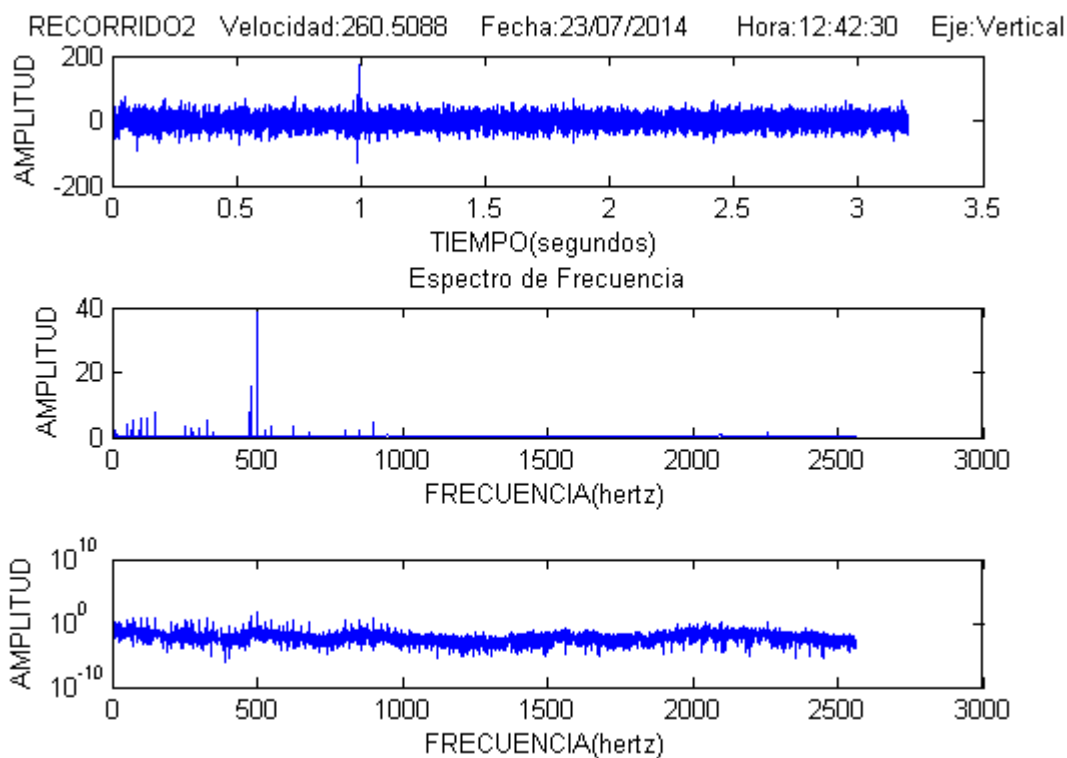


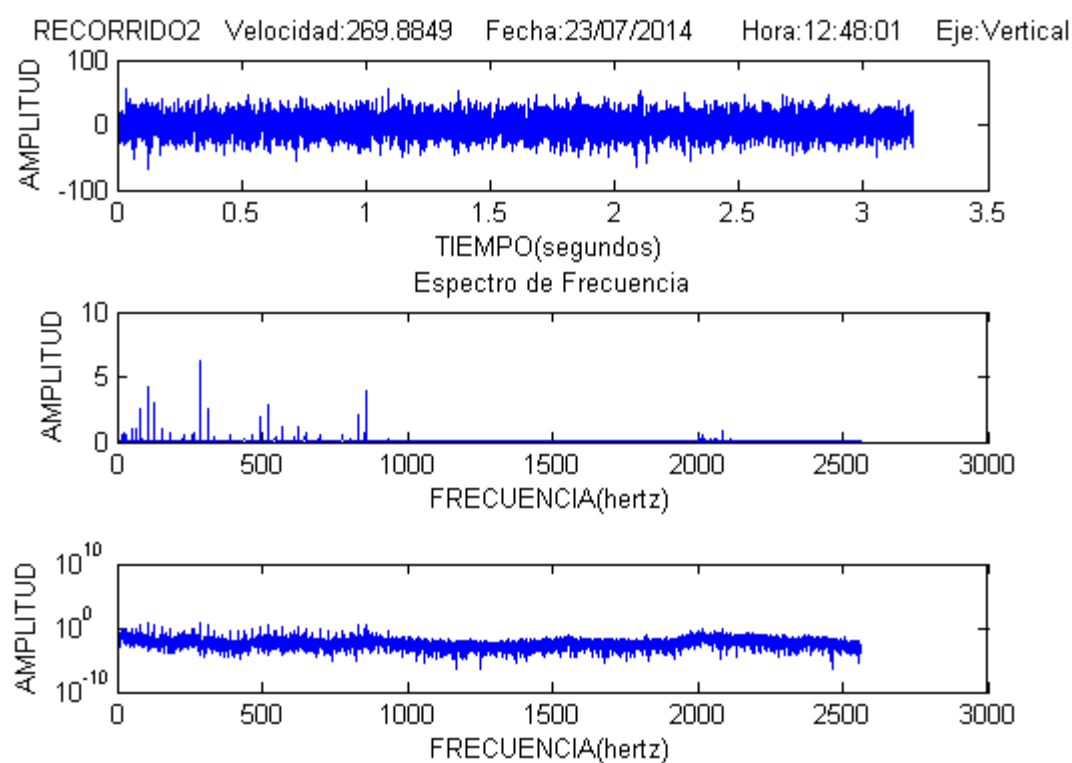
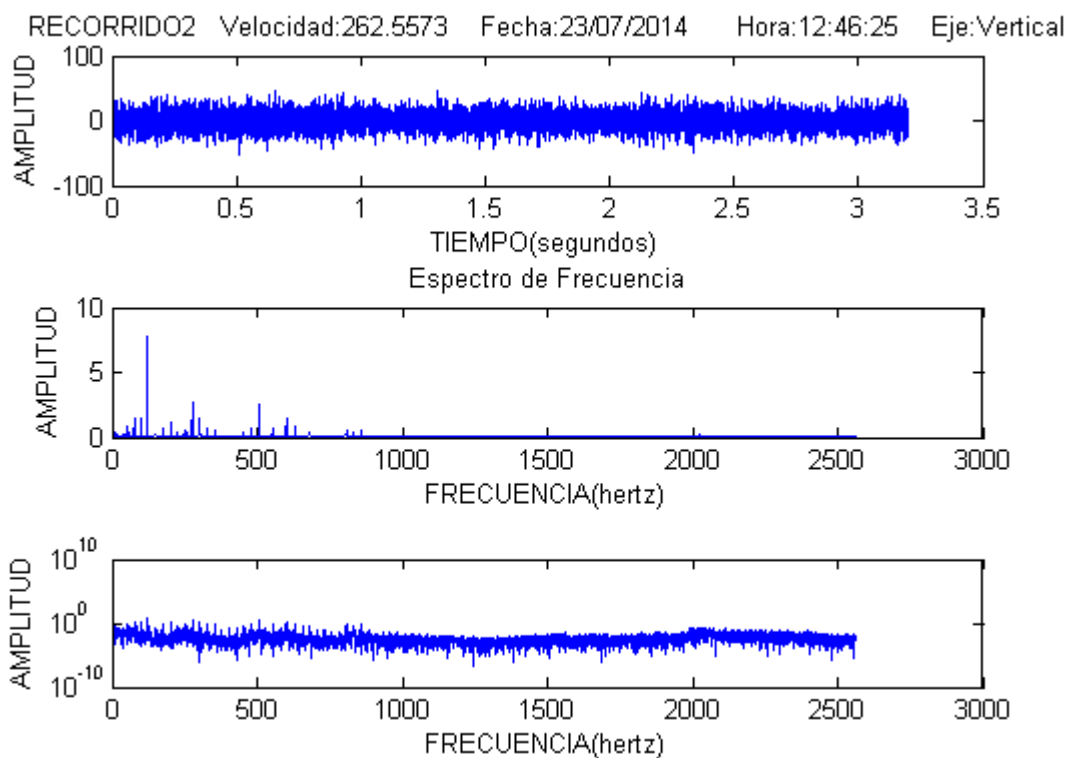


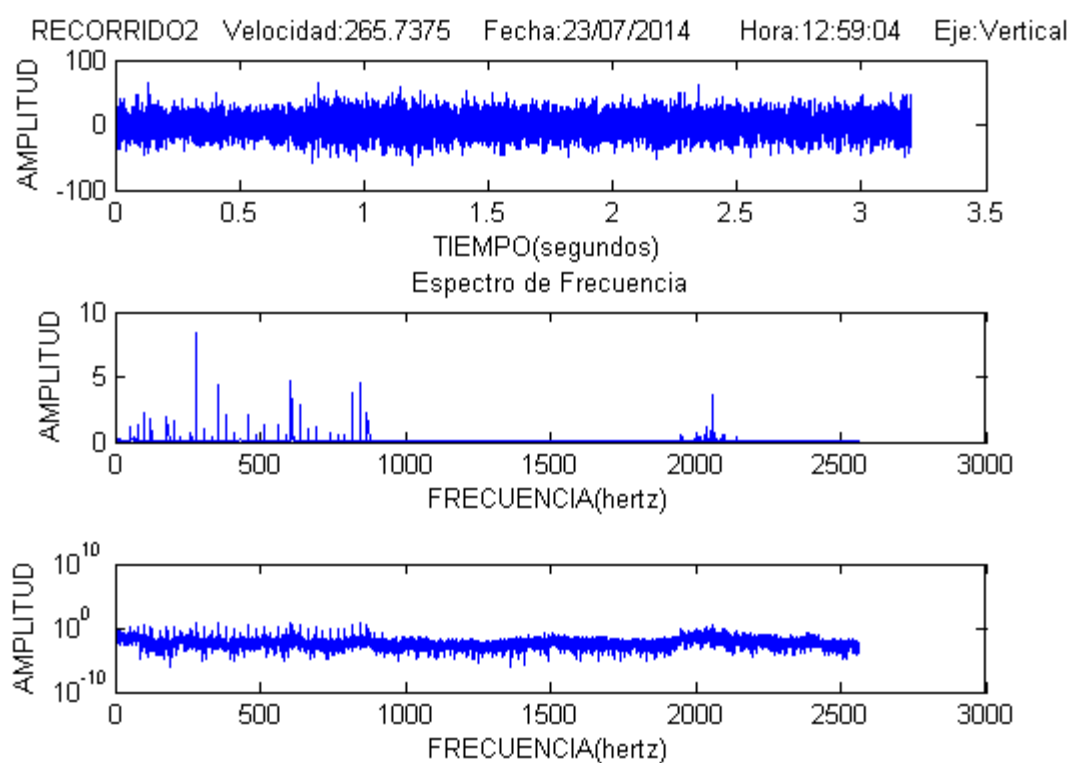
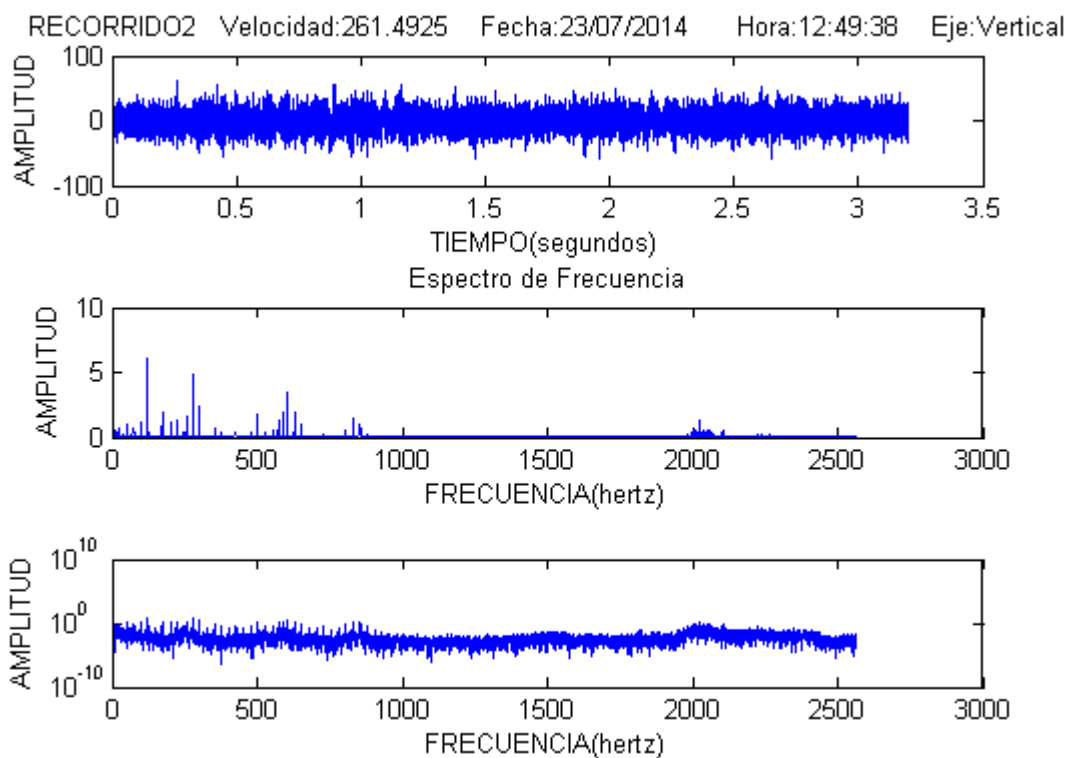


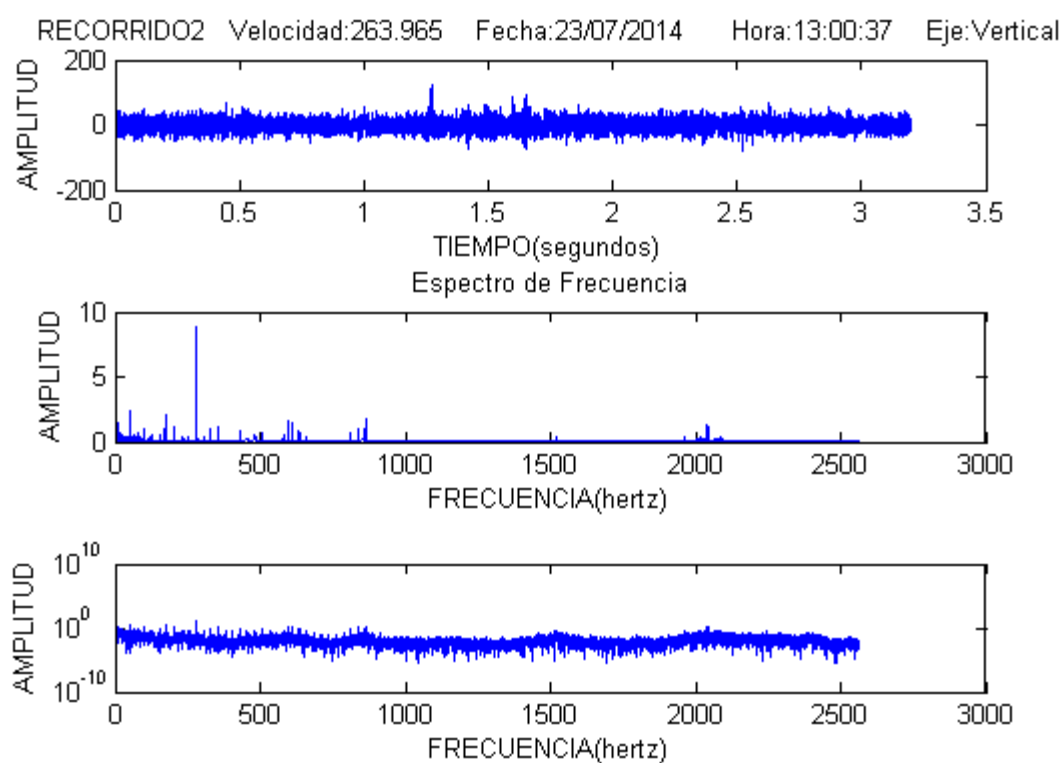
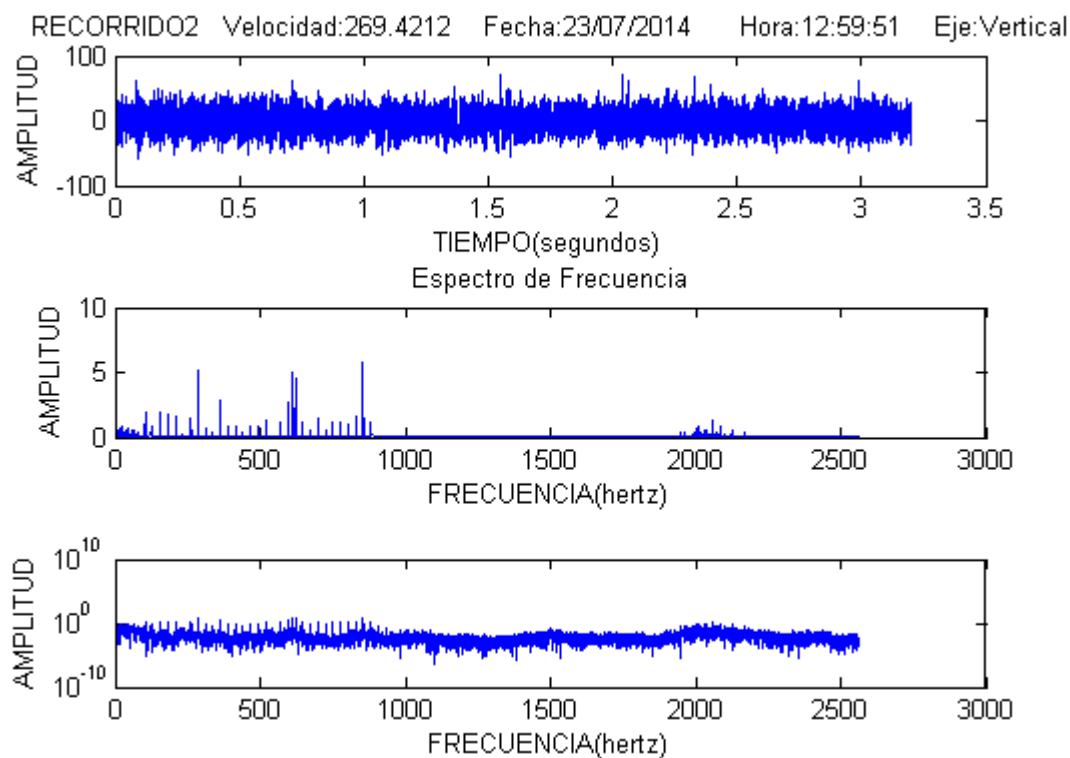


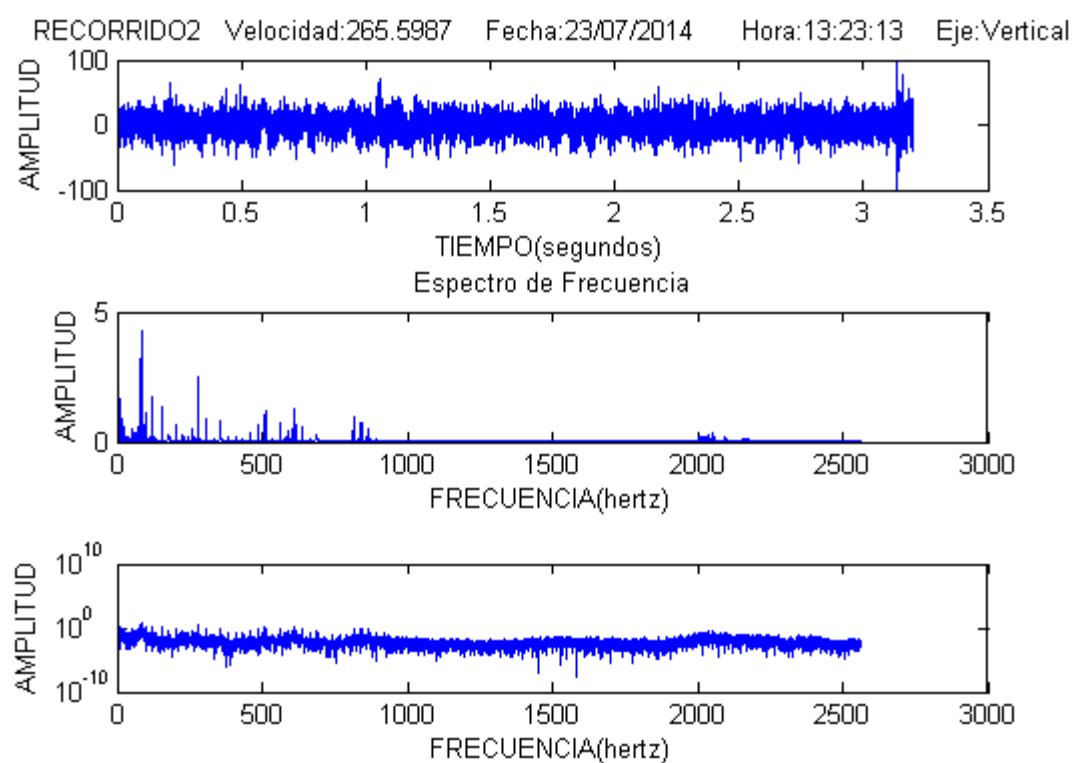
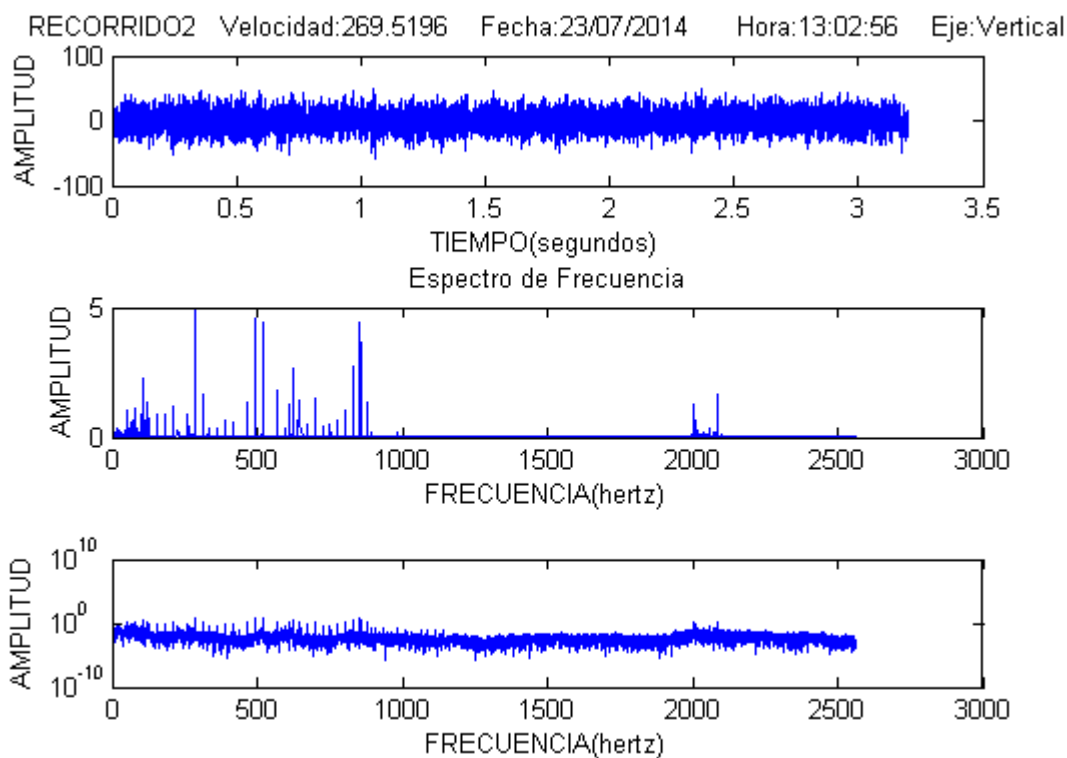


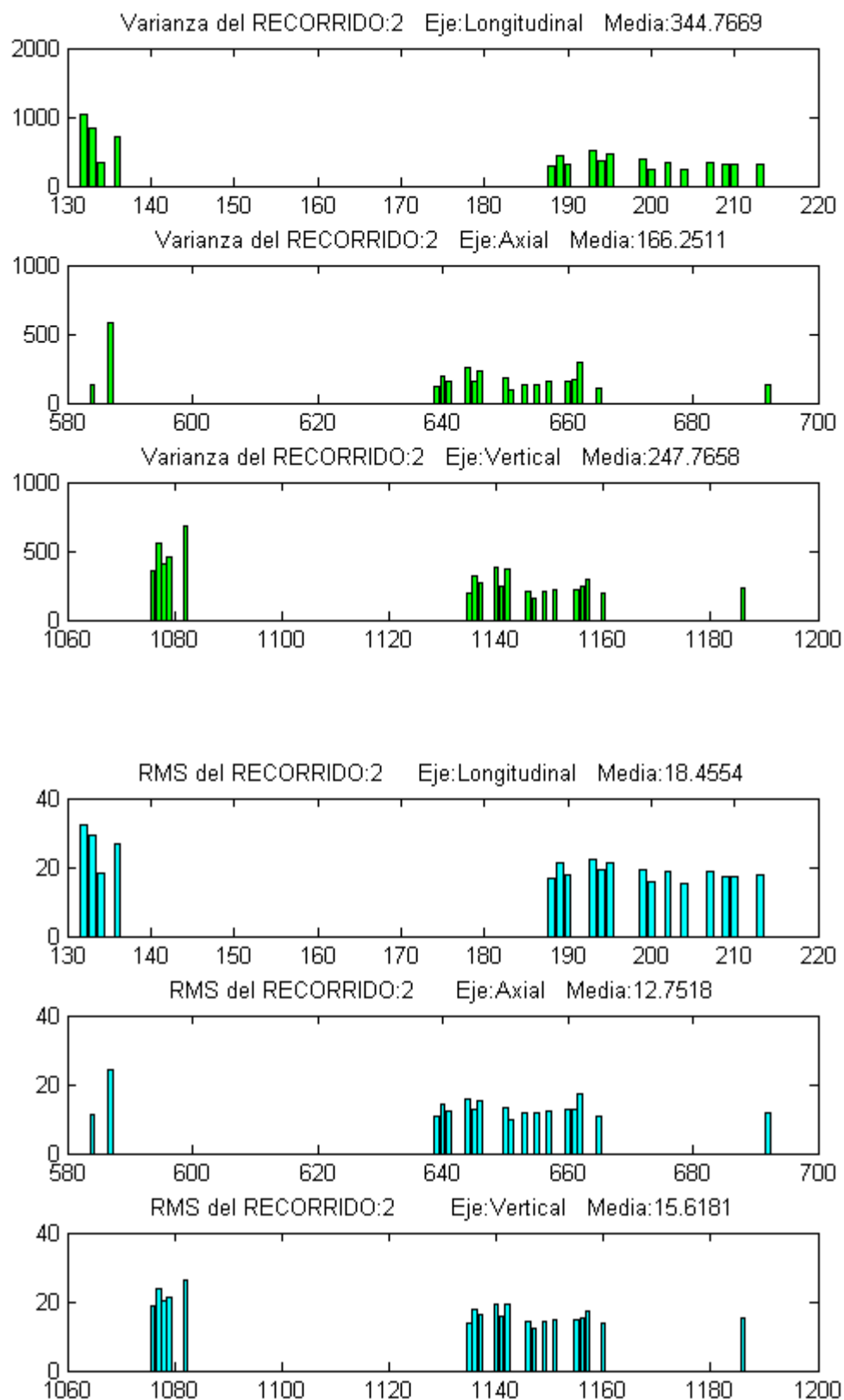


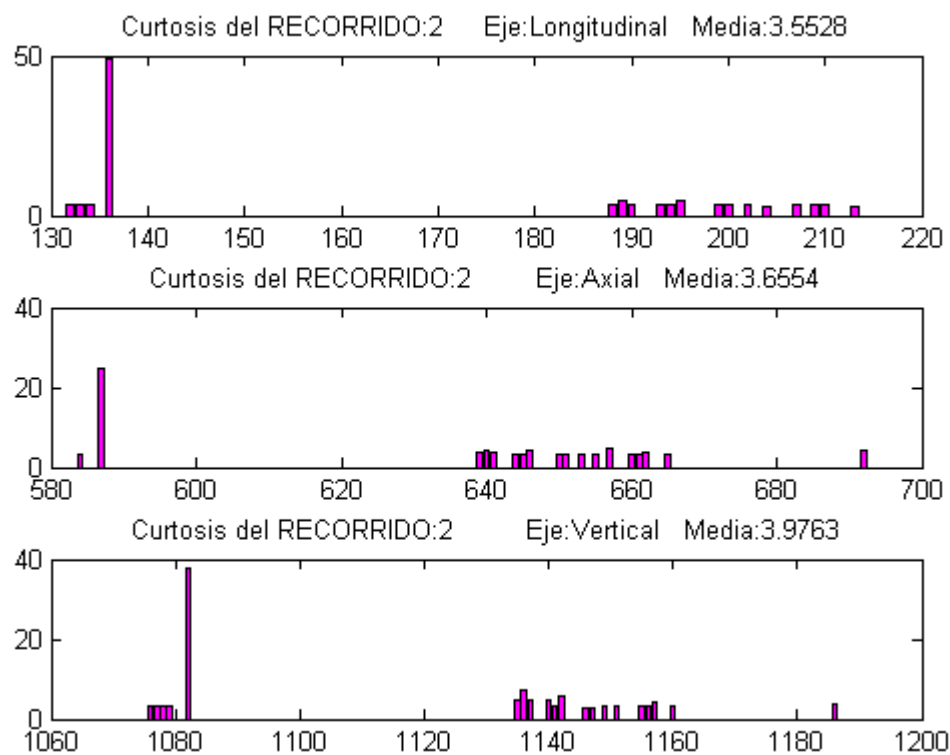




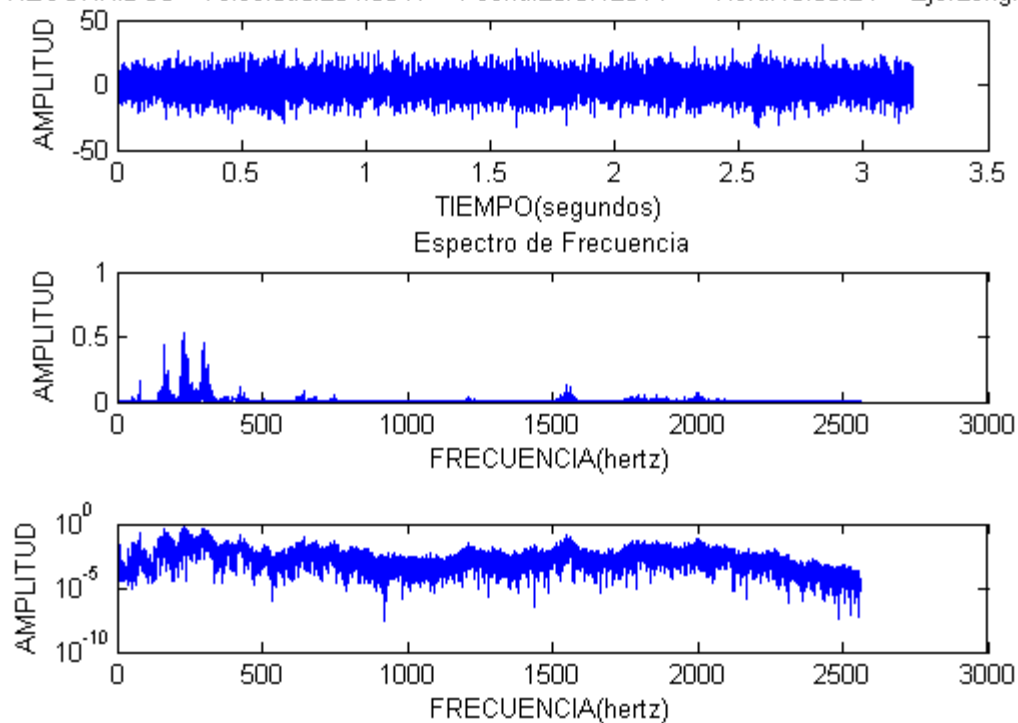




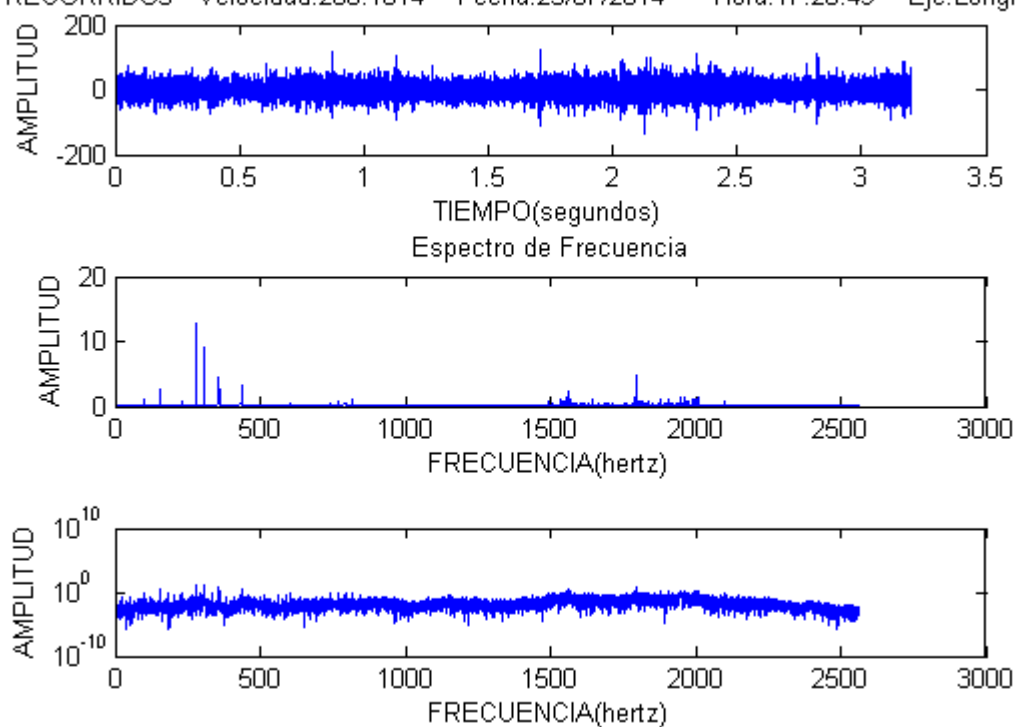




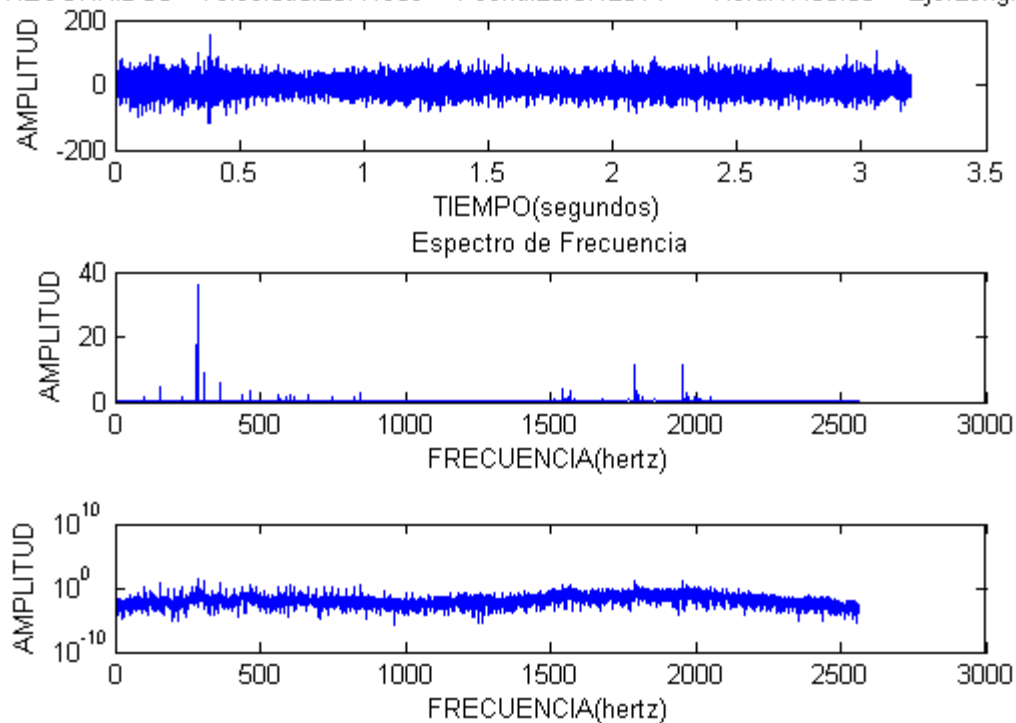
RECORRIDO3 Velocidad:264.6041 Fecha:23/07/2014 Hora:16:08:24 Eje:Longitudinal



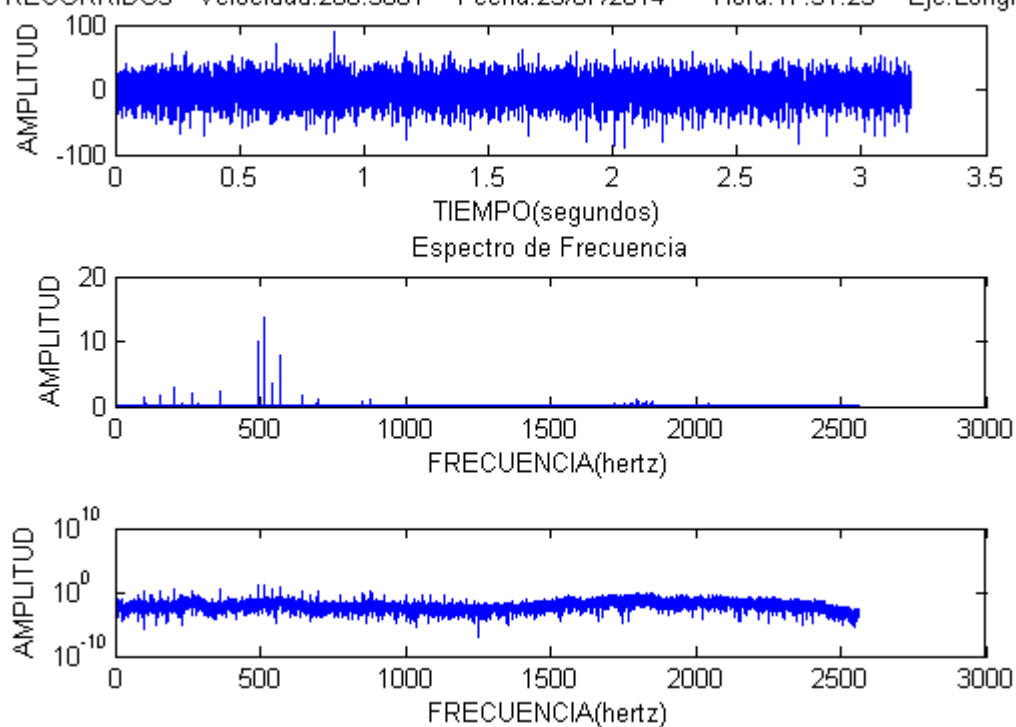
RECORRIDO3 Velocidad:266.1014 Fecha:23/07/2014 Hora:17:20:49 Eje:Longitudinal



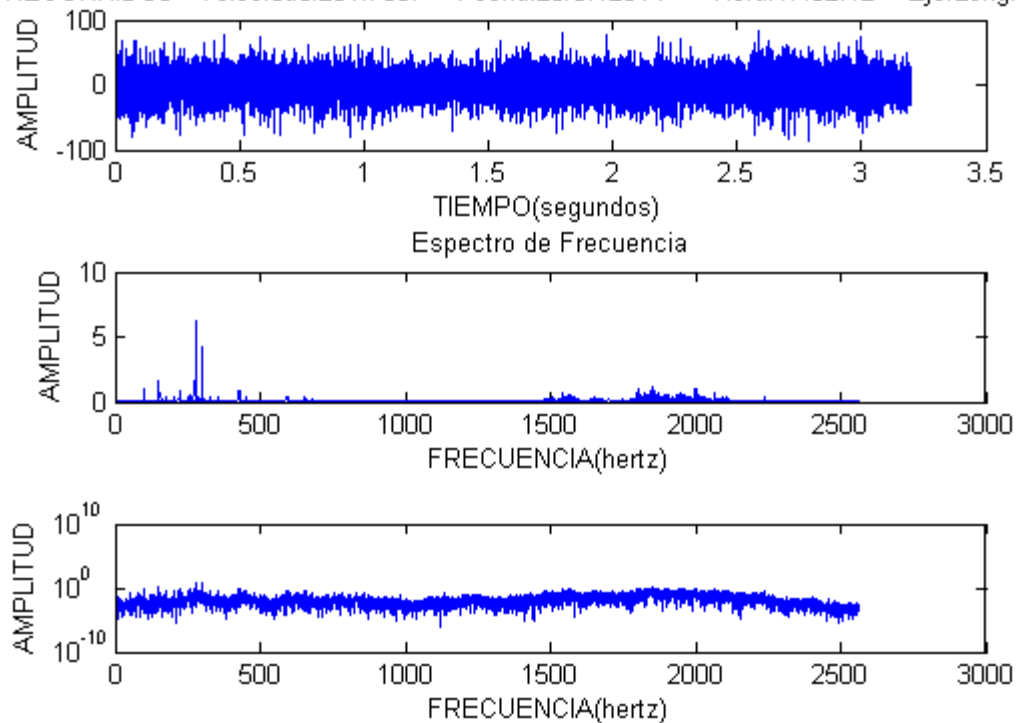
RECORRIDO3 Velocidad:267.1969 Fecha:23/07/2014 Hora:17:30:36 Eje:Longitudinal



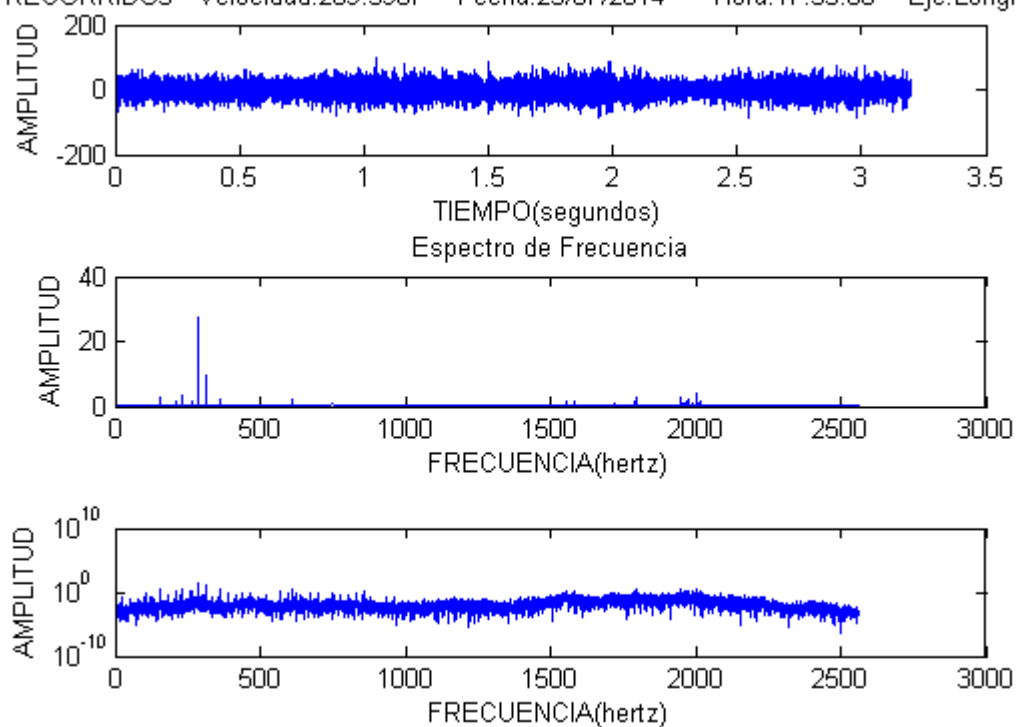
RECORRIDO3 Velocidad:268.3081 Fecha:23/07/2014 Hora:17:31:23 Eje:Longitudinal



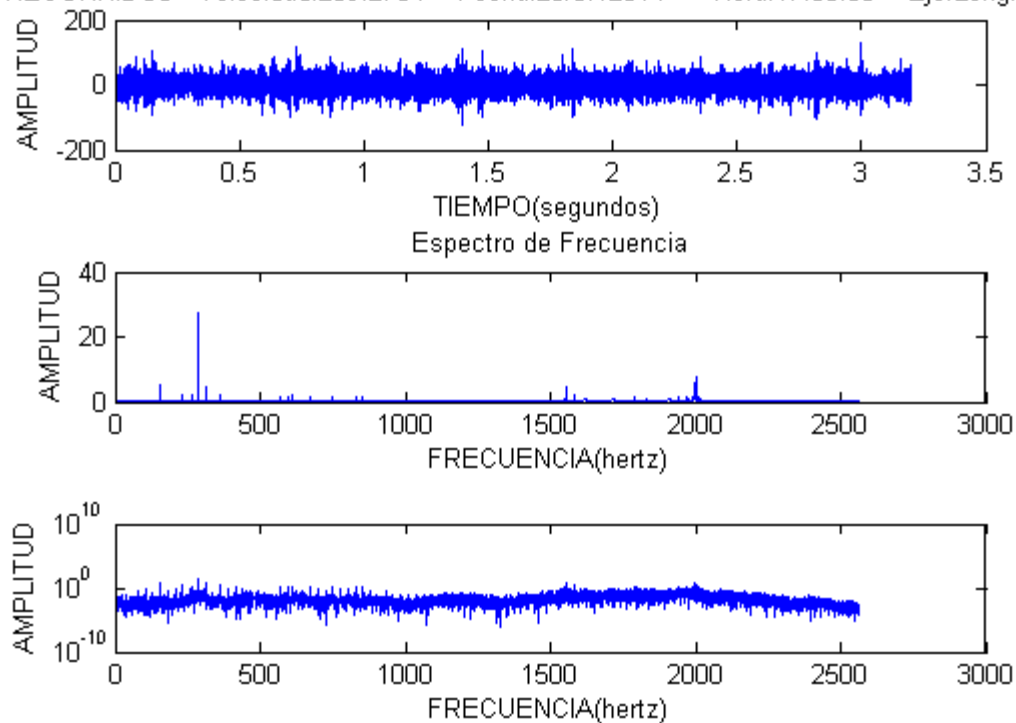
RECORRIDO3 Velocidad:261.7667 Fecha:23/07/2014 Hora:17:32:12 Eje:Longitudinal



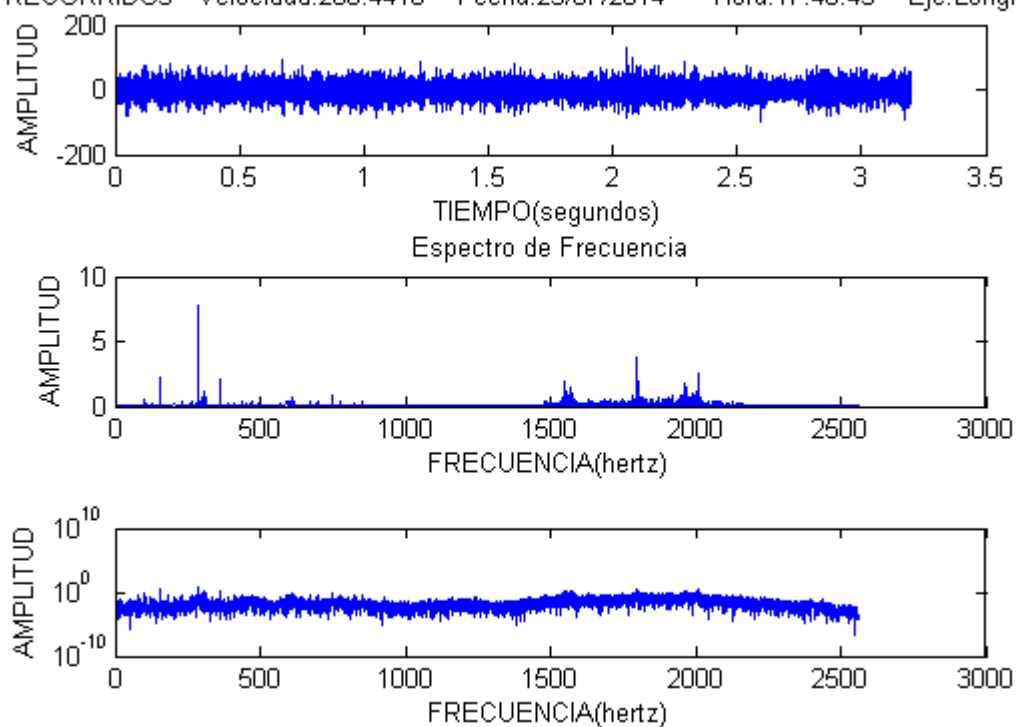
RECORRIDO3 Velocidad:269.5967 Fecha:23/07/2014 Hora:17:33:00 Eje:Longitudinal



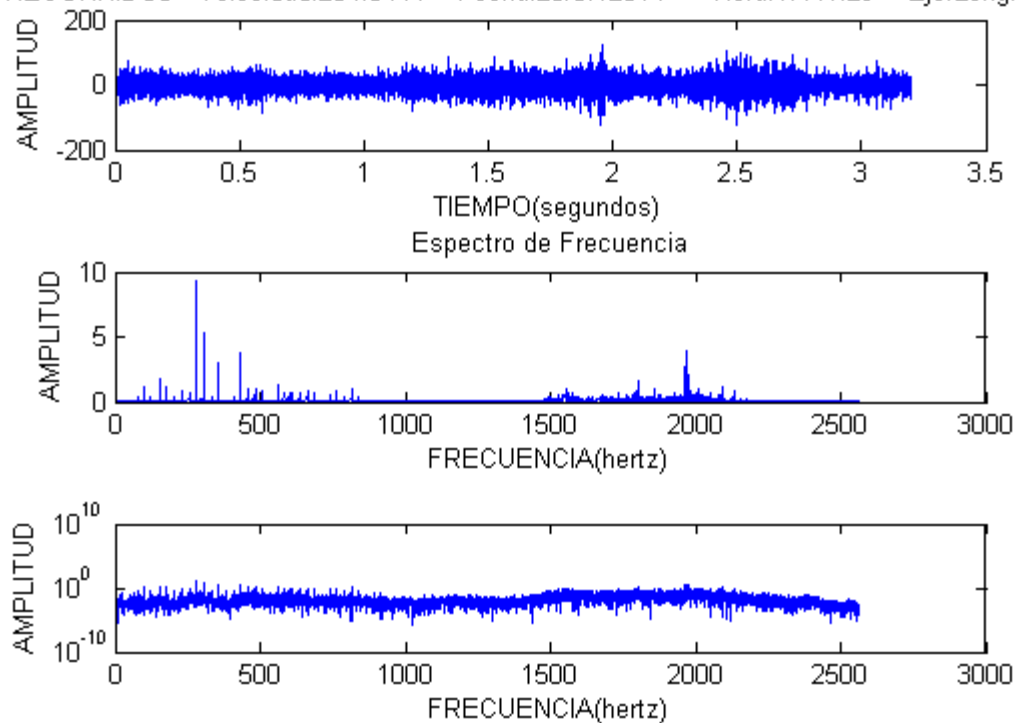
RECORRIDO3 Velocidad:269.2734 Fecha:23/07/2014 Hora:17:33:50 Eje:Longitudinal



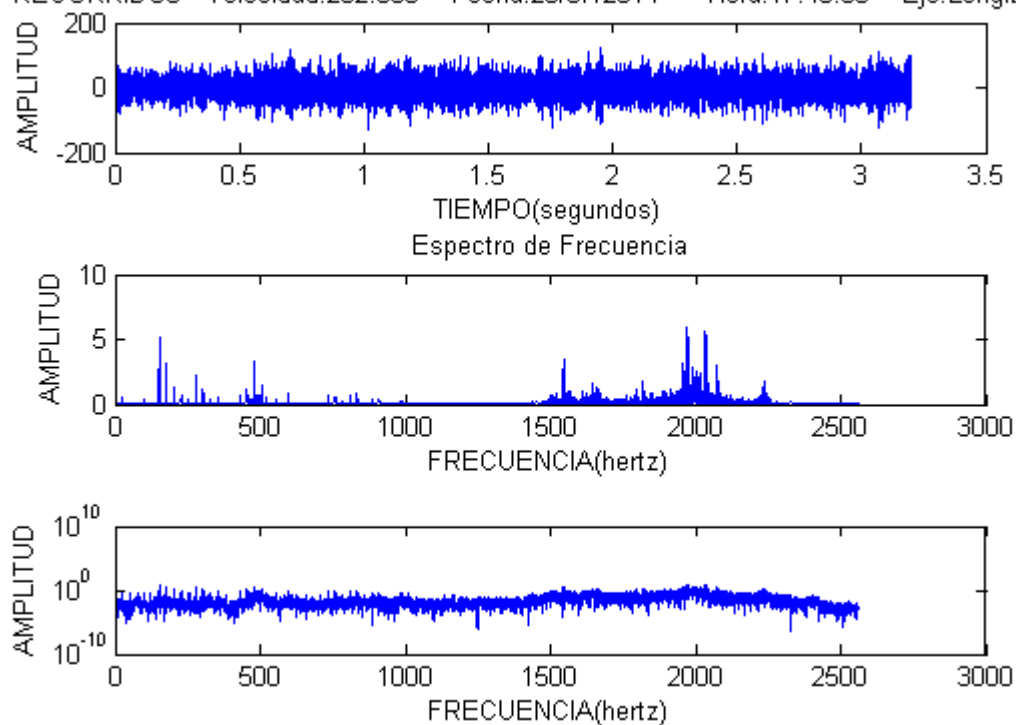
RECORRIDO3 Velocidad:268.4418 Fecha:23/07/2014 Hora:17:40:43 Eje:Longitudinal



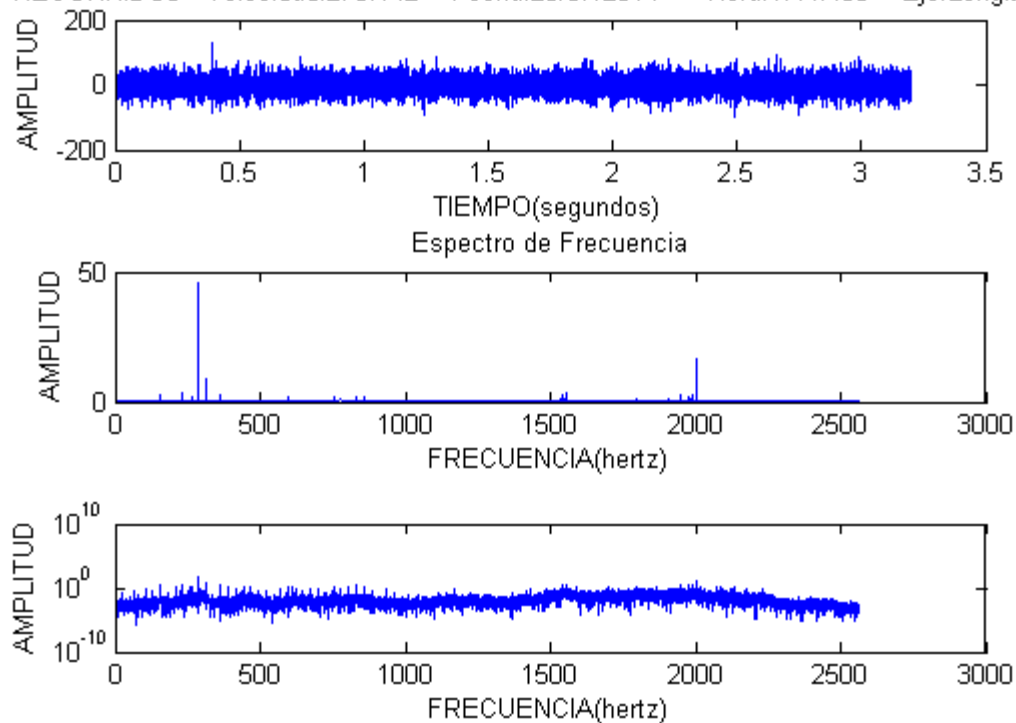
RECORRIDO3 Velocidad:264.8444 Fecha:23/07/2014 Hora:17:41:29 Eje:Longitudinal



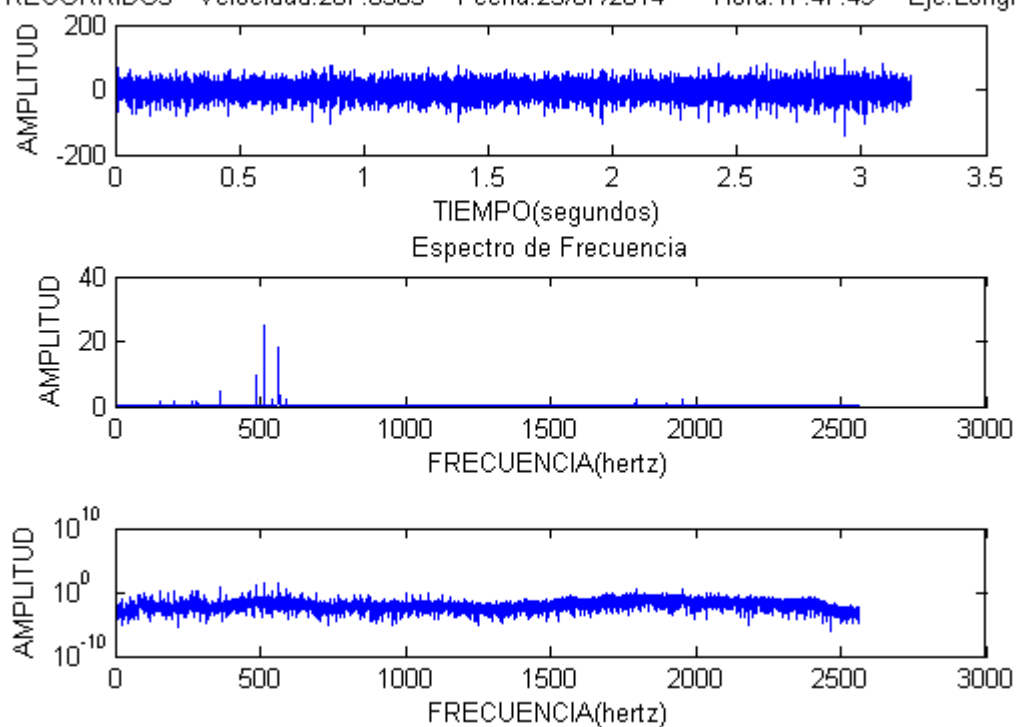
RECORRIDO3 Velocidad:262.885 Fecha:23/07/2014 Hora:17:43:03 Eje:Longitudinal



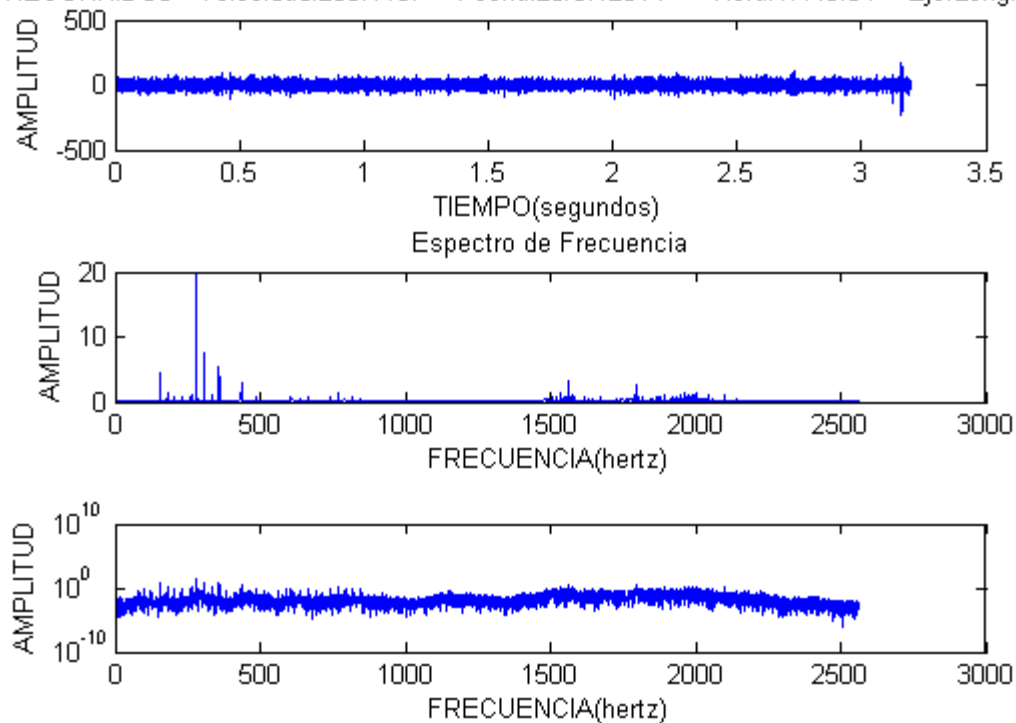
RECORRIDO3 Velocidad:270.142 Fecha:23/07/2014 Hora:17:47:03 Eje:Longitudinal



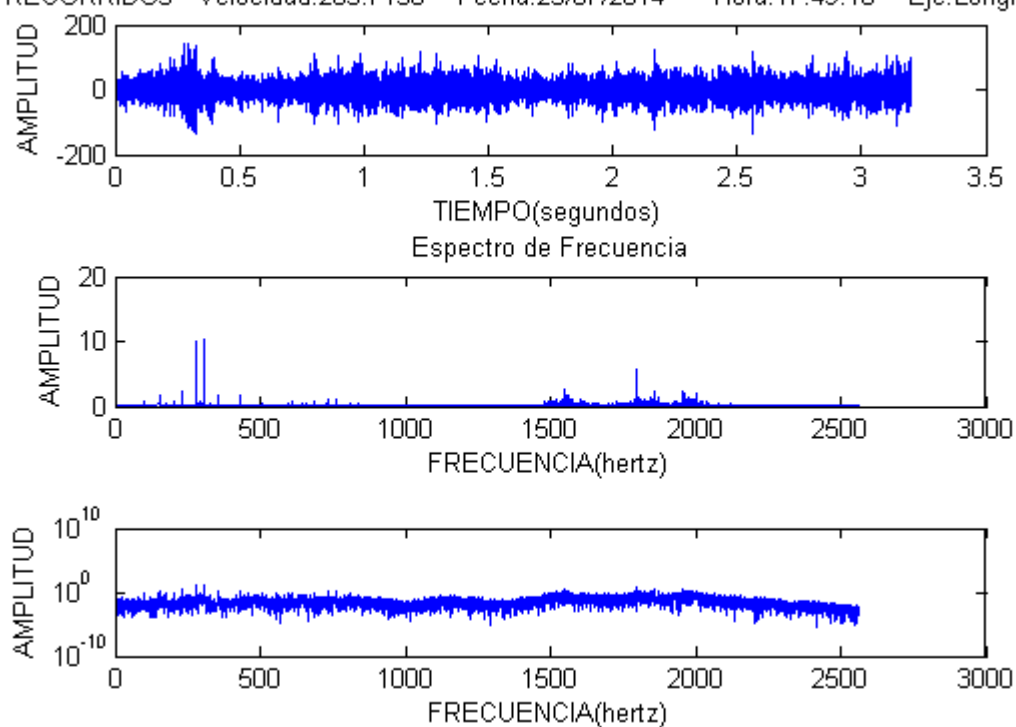
RECORRIDO3 Velocidad:267.0563 Fecha:23/07/2014 Hora:17:47:49 Eje:Longitudinal



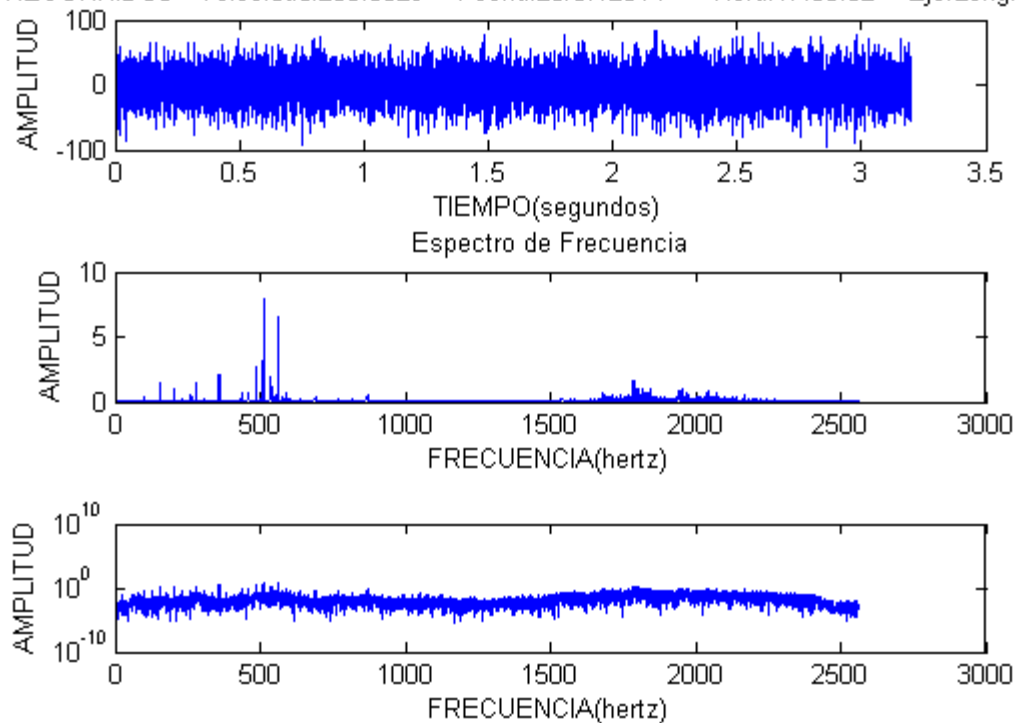
RECORRIDO3 Velocidad:266.1137 Fecha:23/07/2014 Hora:17:48:34 Eje:Longitudinal



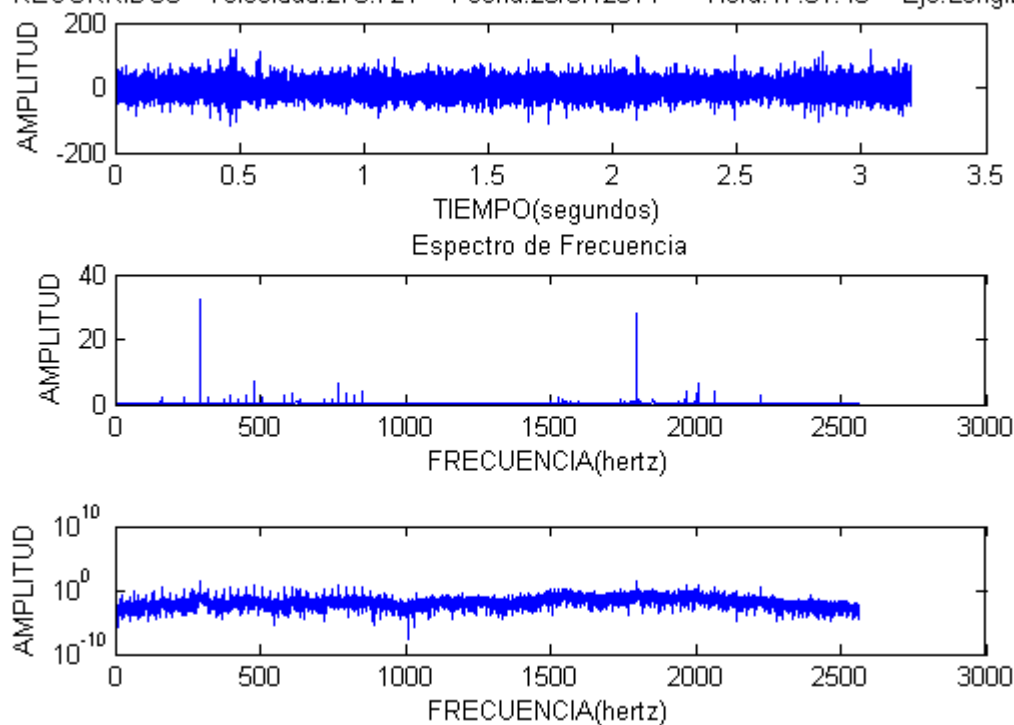
RECORRIDO3 Velocidad:263.7156 Fecha:23/07/2014 Hora:17:49:18 Eje:Longitudinal



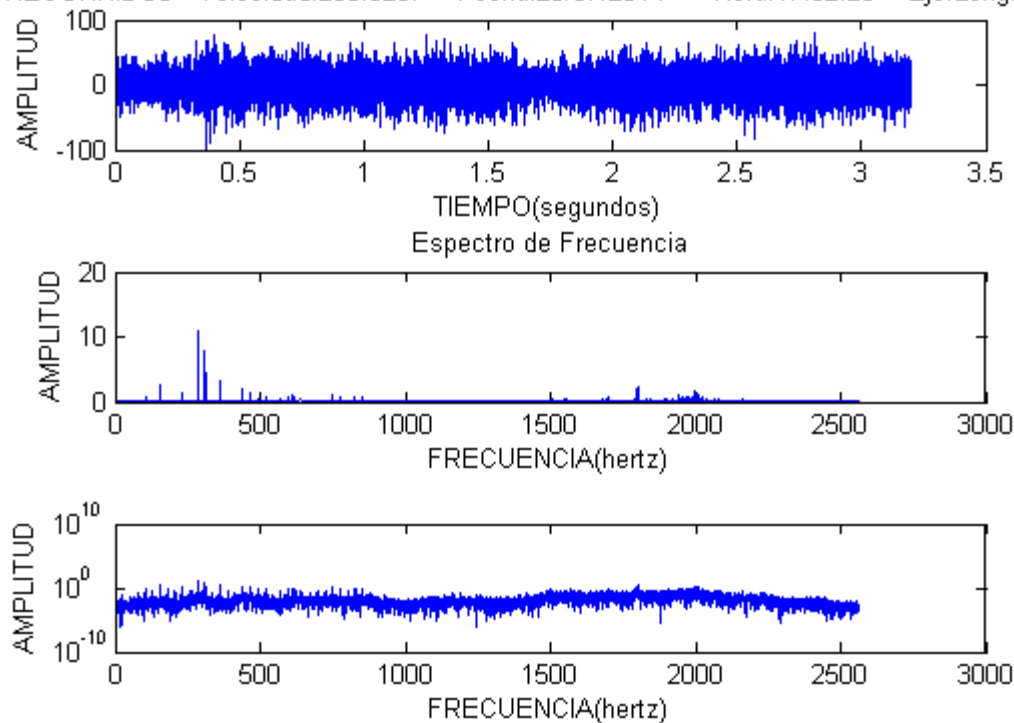
RECORRIDO3 Velocidad:266.0529 Fecha:23/07/2014 Hora:17:50:52 Eje:Longitudinal



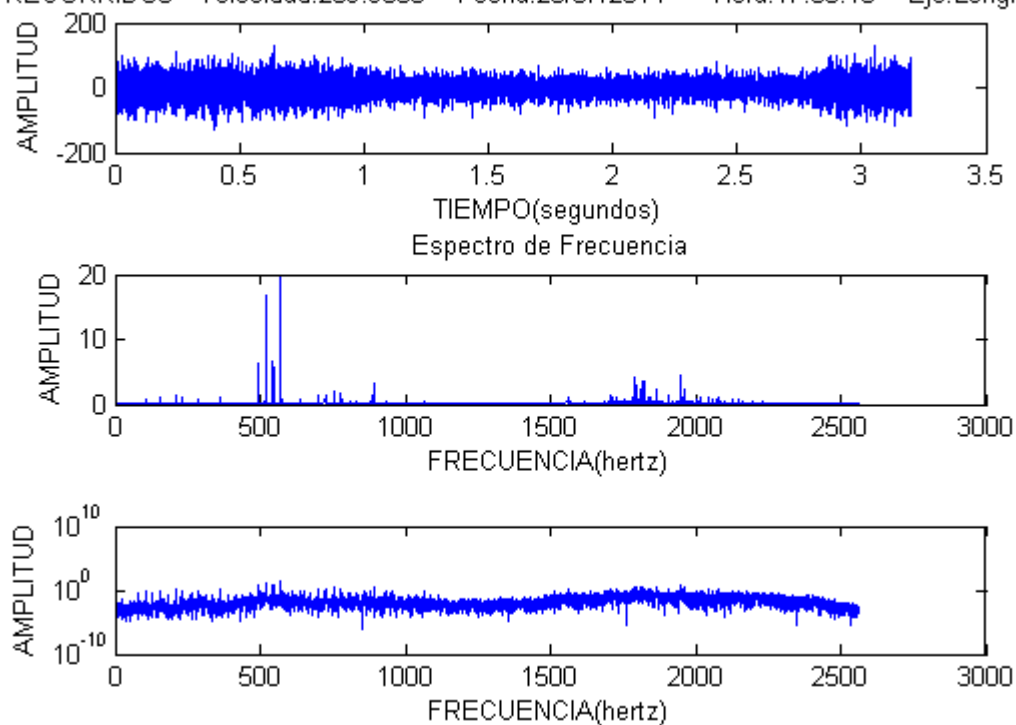
RECORRIDO3 Velocidad:276.721 Fecha:23/07/2014 Hora:17:51:40 Eje:Longitudinal



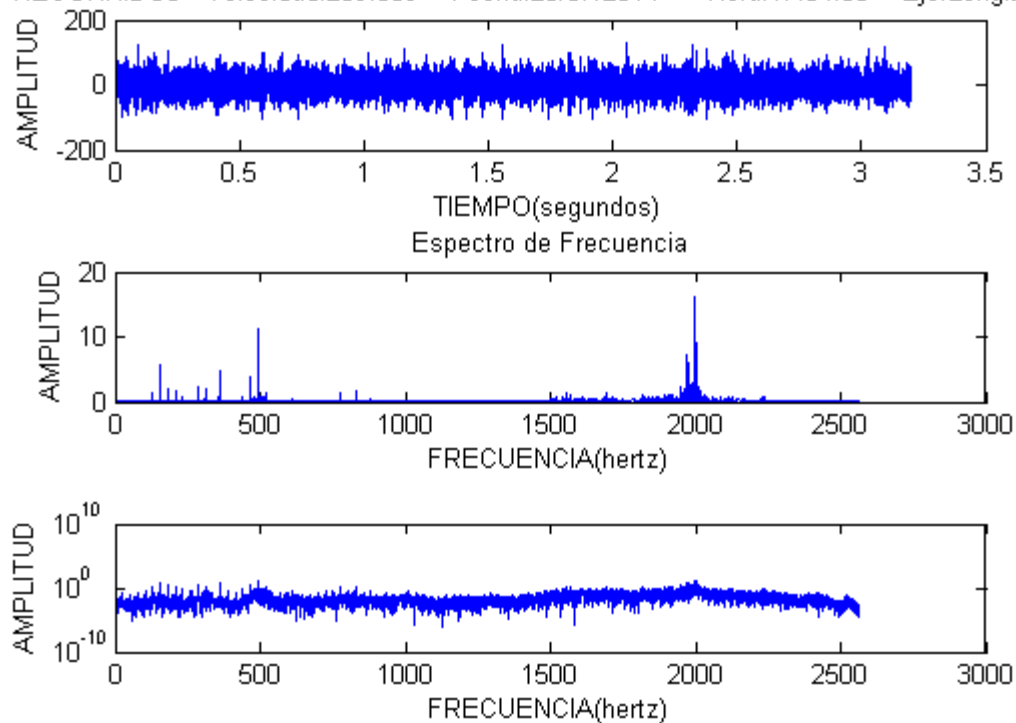
RECORRIDO3 Velocidad:268.8287 Fecha:23/07/2014 Hora:17:52:28 Eje:Longitudinal



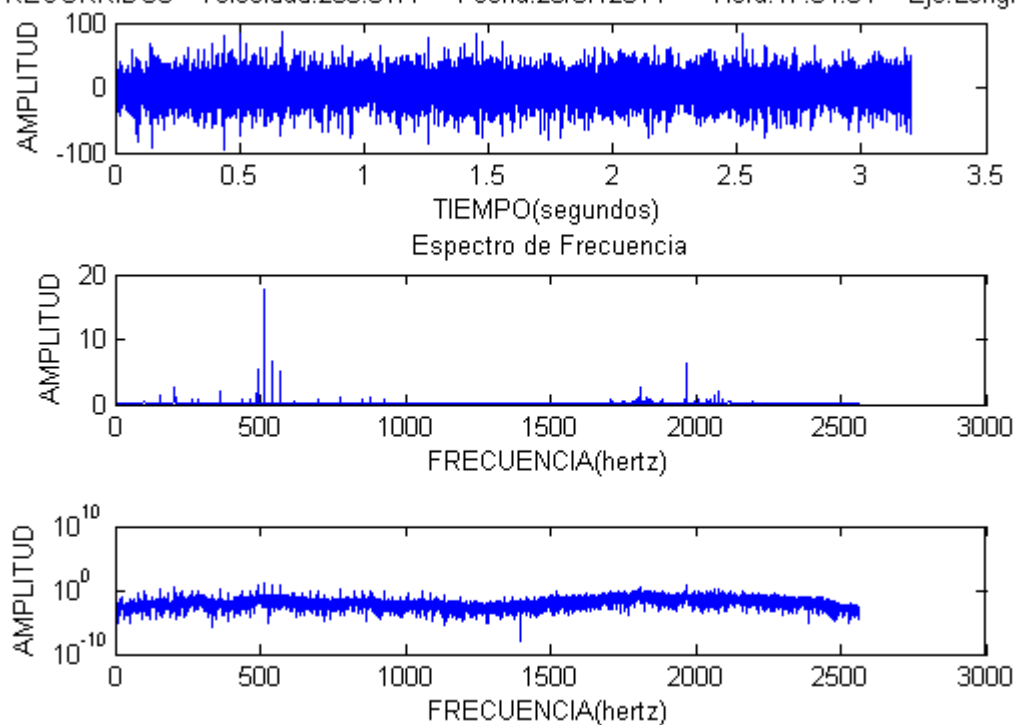
RECORRIDO3 Velocidad:269.9368 Fecha:23/07/2014 Hora:17:53:16 Eje:Longitudinal



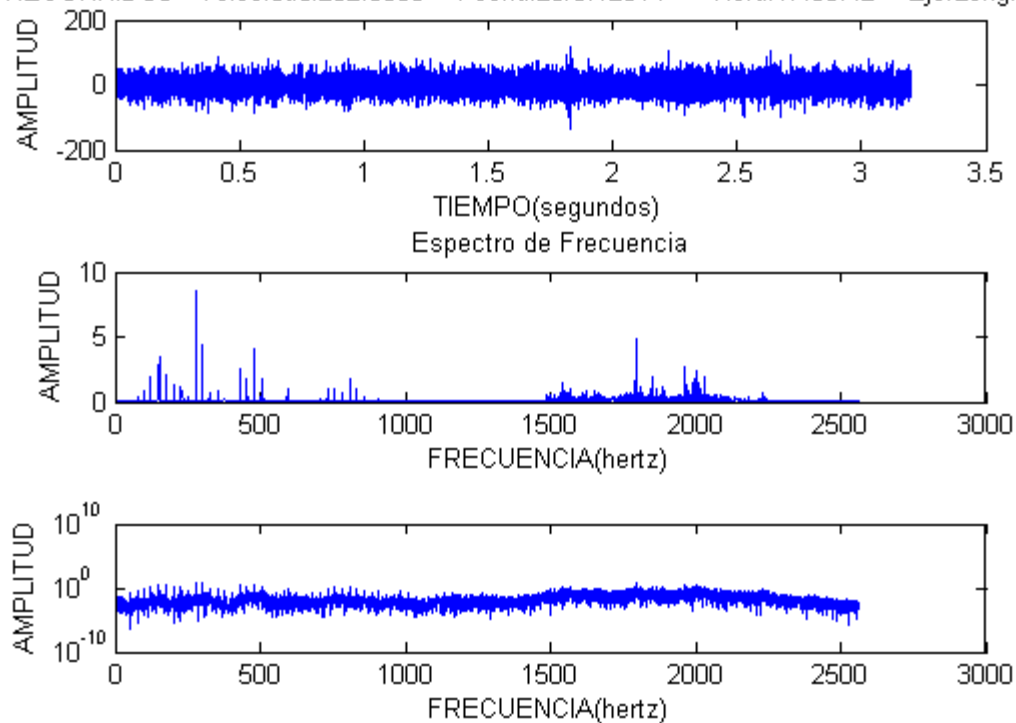
RECORRIDO3 Velocidad:269.369 Fecha:23/07/2014 Hora:17:54:06 Eje:Longitudinal



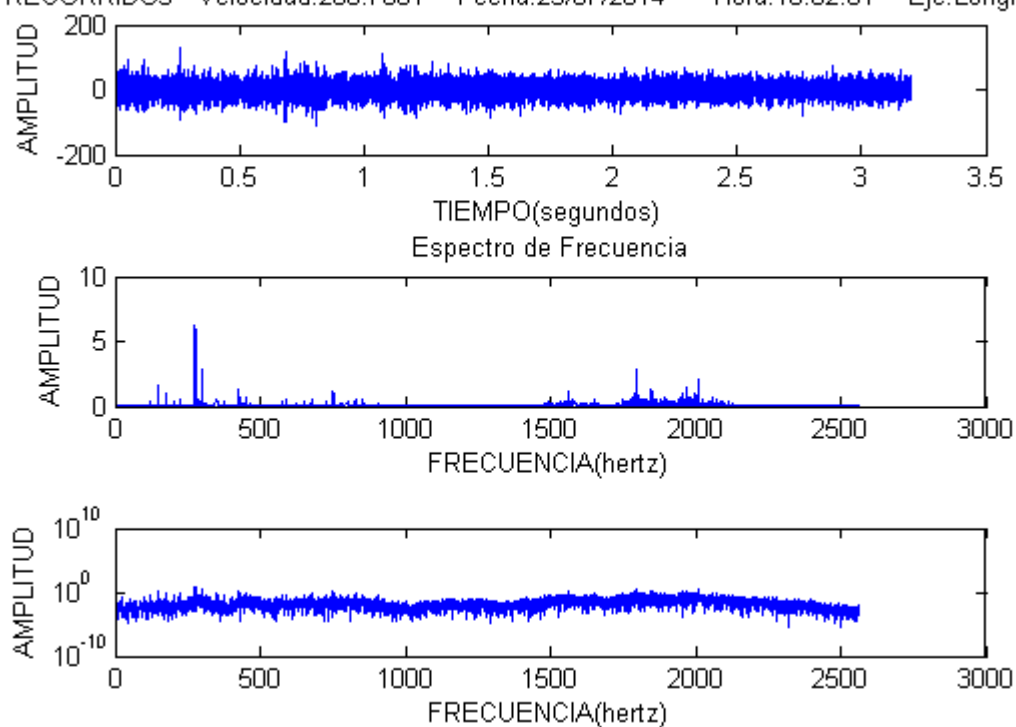
RECORRIDO3 Velocidad:268.6177 Fecha:23/07/2014 Hora:17:54:54 Eje:Longitudinal



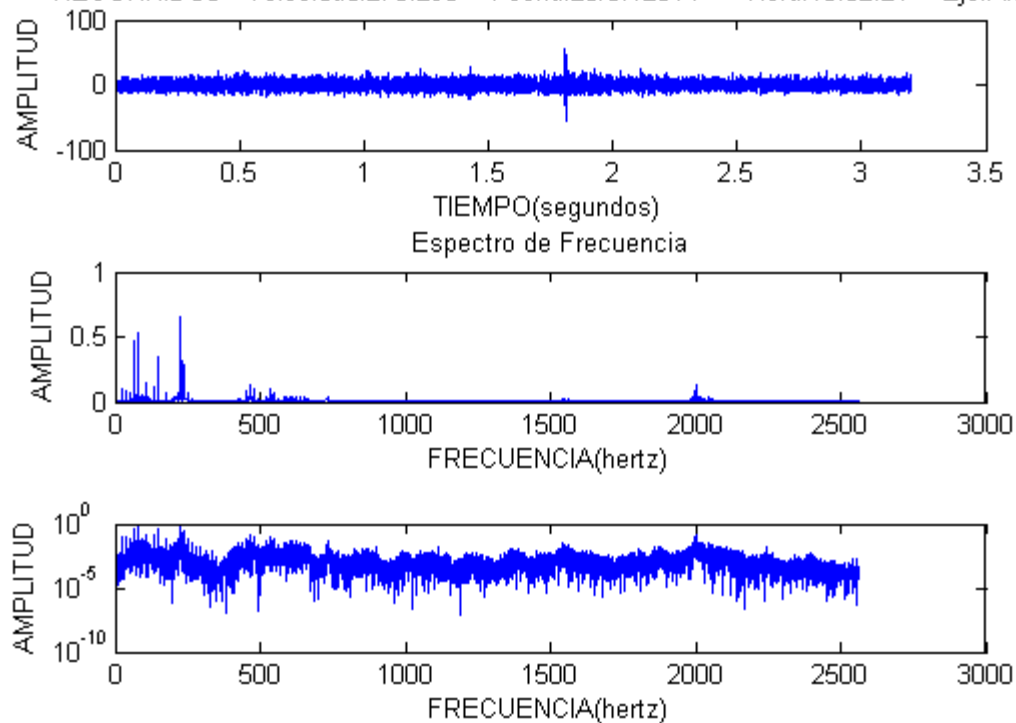
RECORRIDO3 Velocidad:262.5566 Fecha:23/07/2014 Hora:17:55:42 Eje:Longitudinal

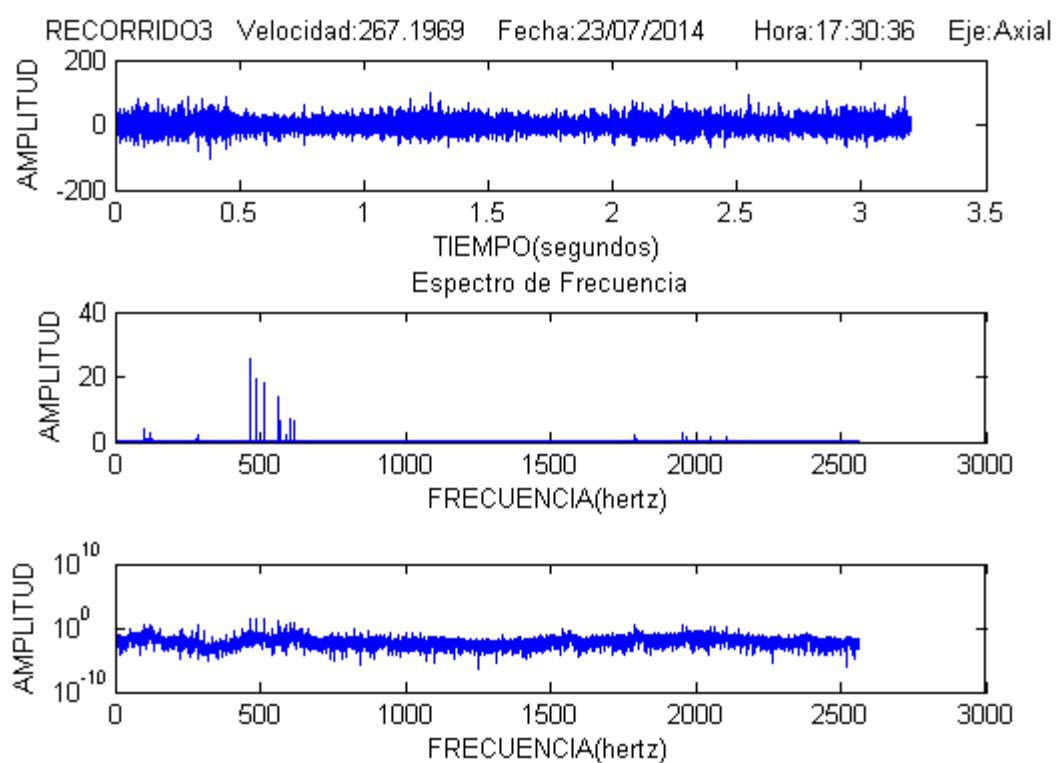
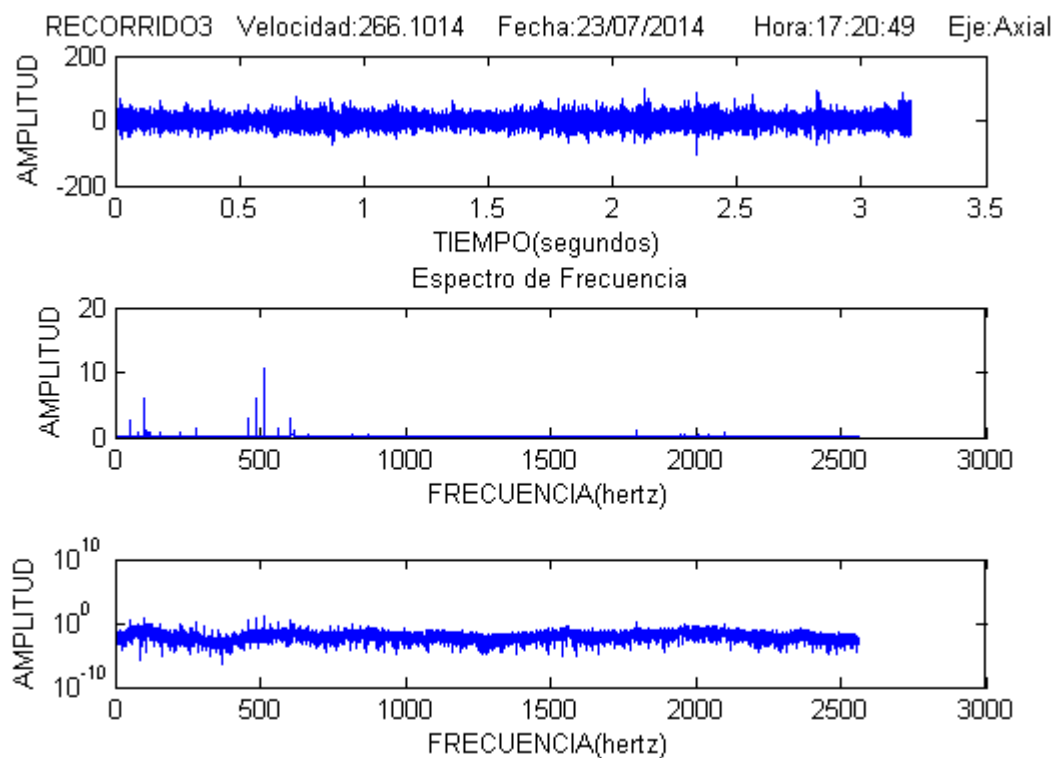


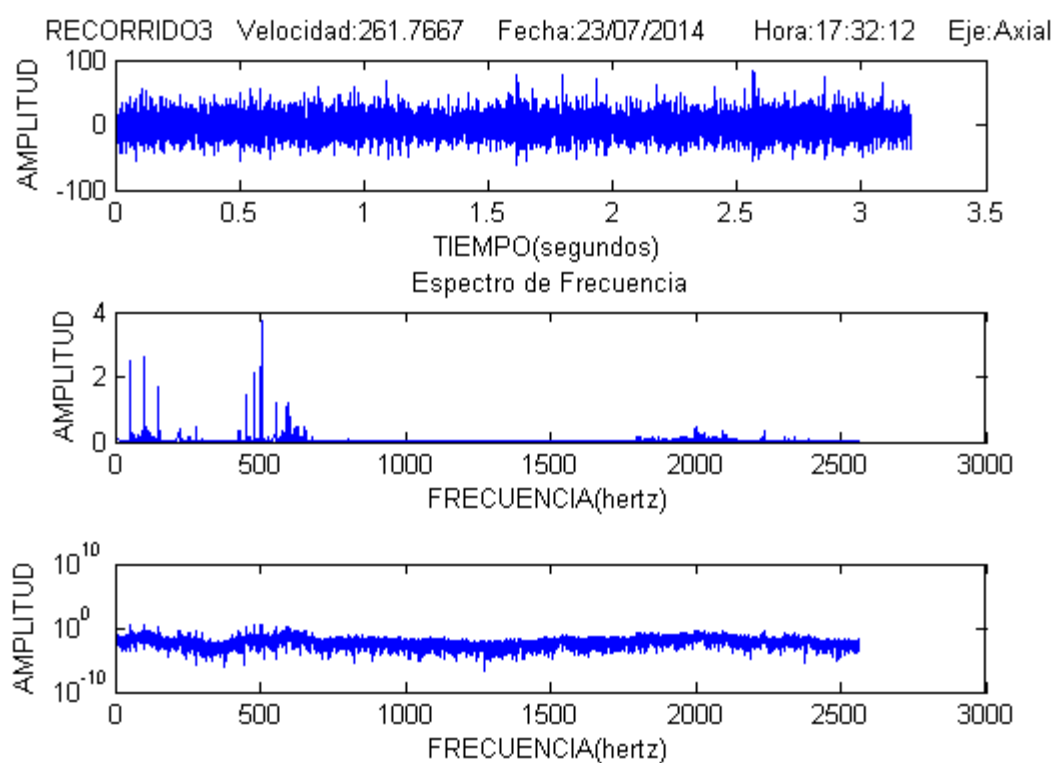
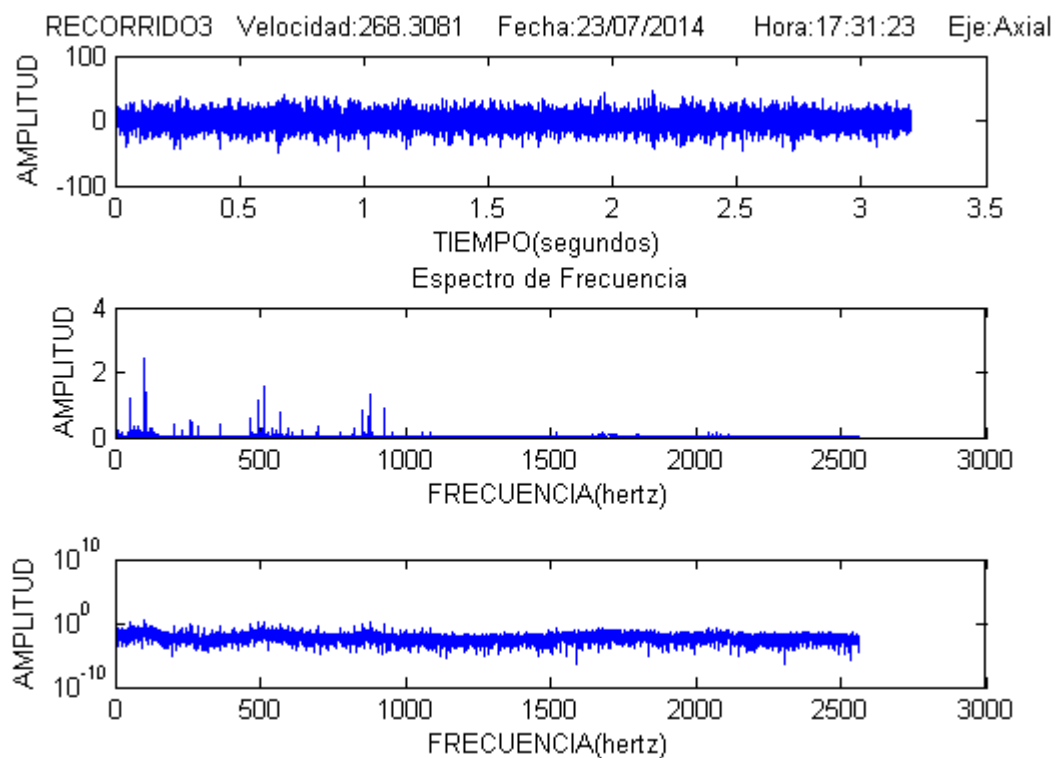
RECORRIDO3 Velocidad:260.7881 Fecha:23/07/2014 Hora:18:02:01 Eje:Longitudinal

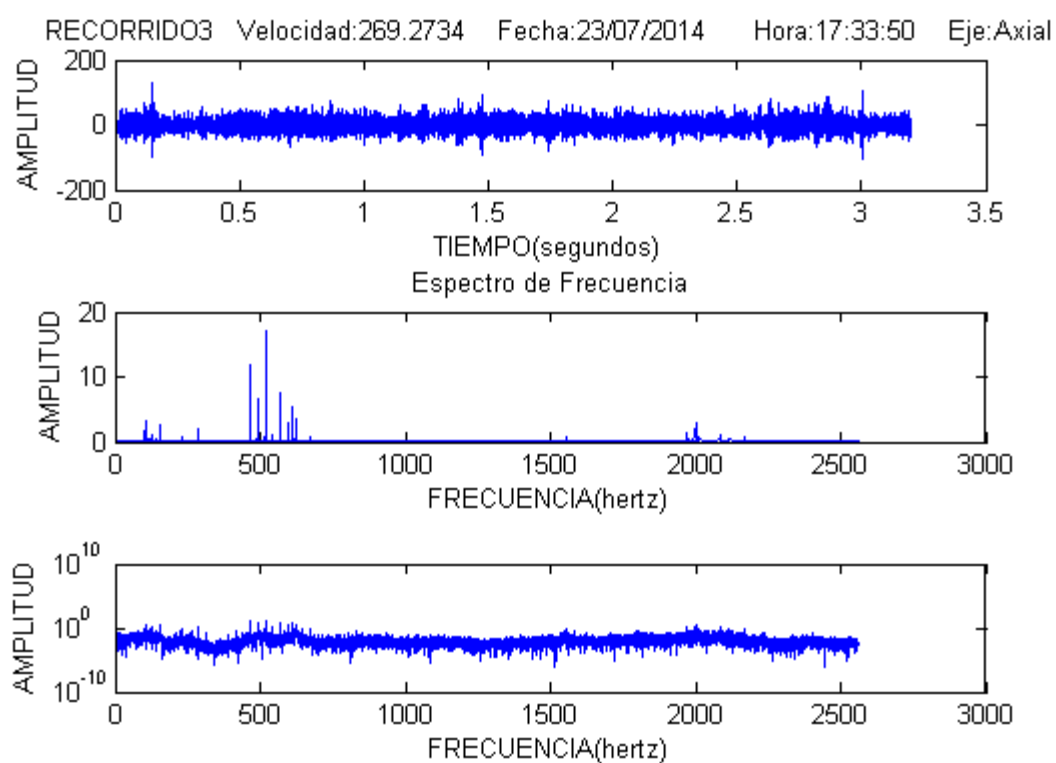
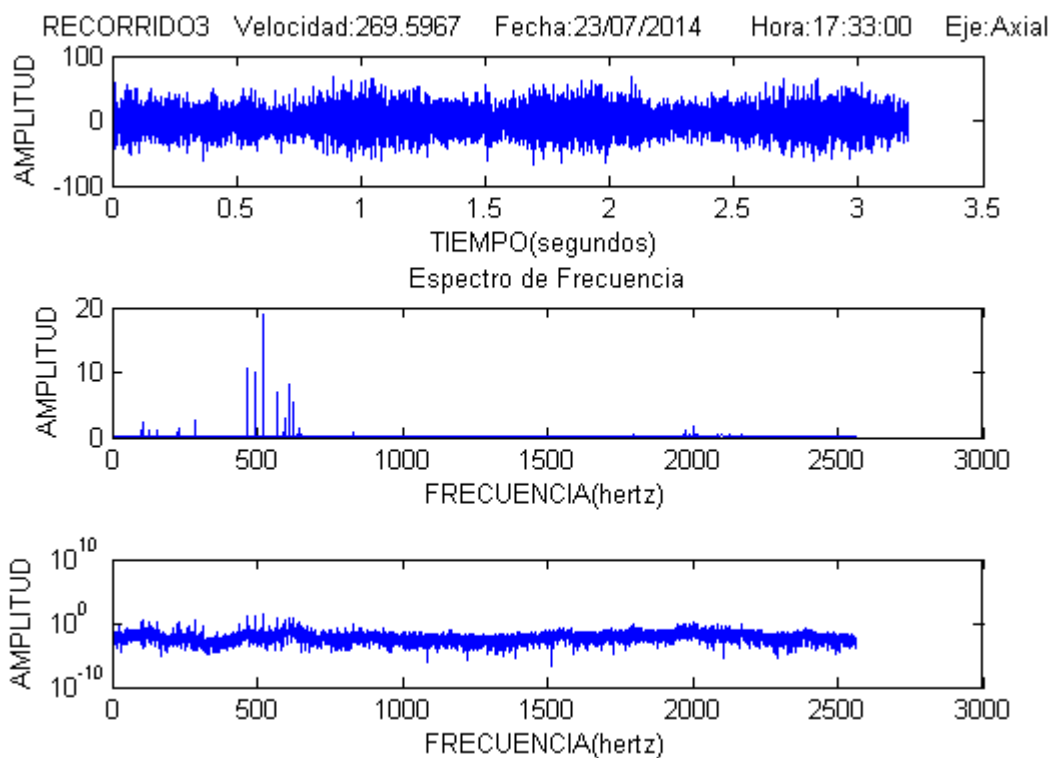


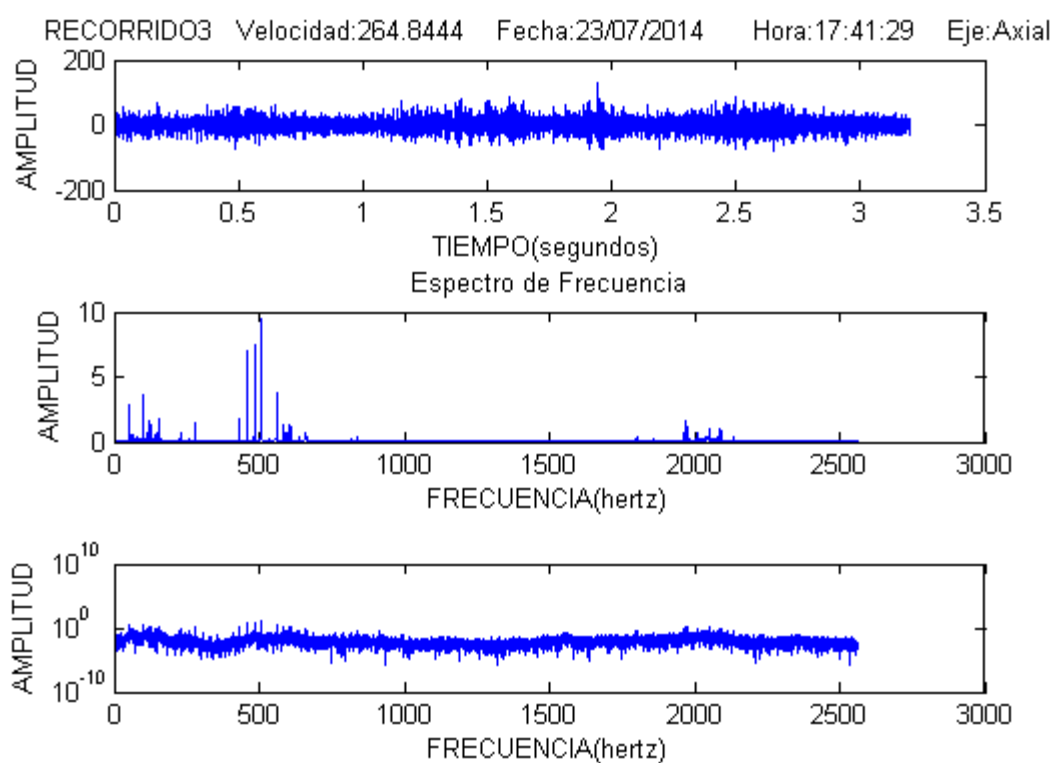
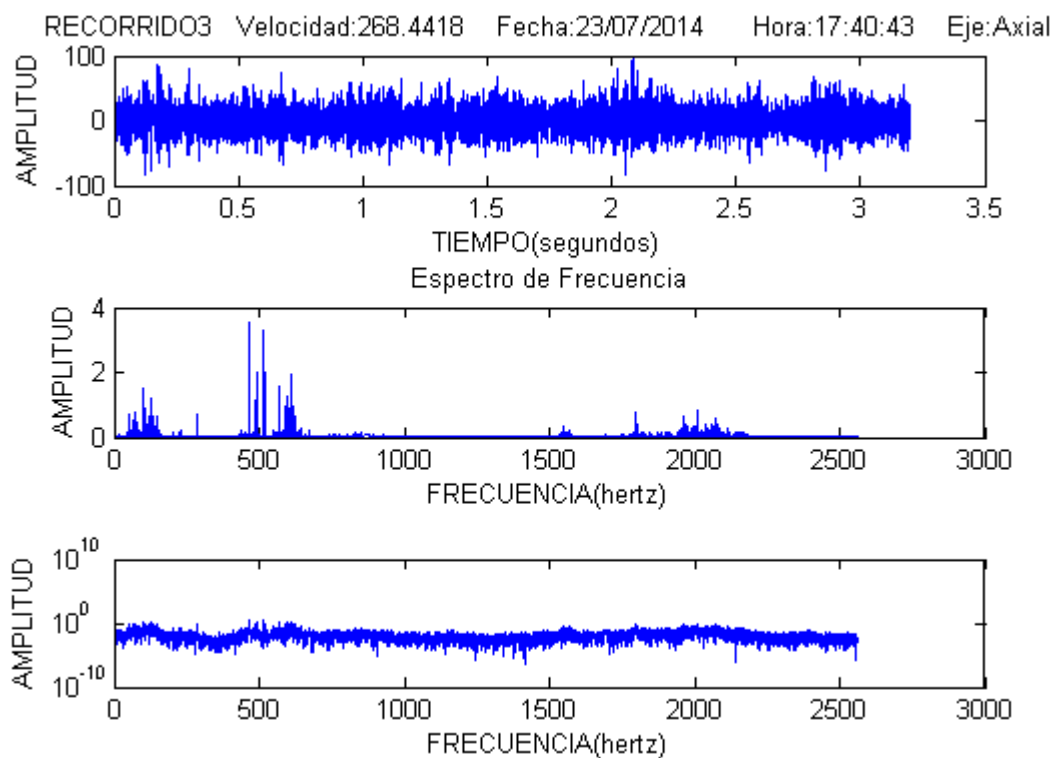
RECORRIDO3 Velocidad:276.293 Fecha:23/07/2014 Hora:16:52:21 Eje:Axial

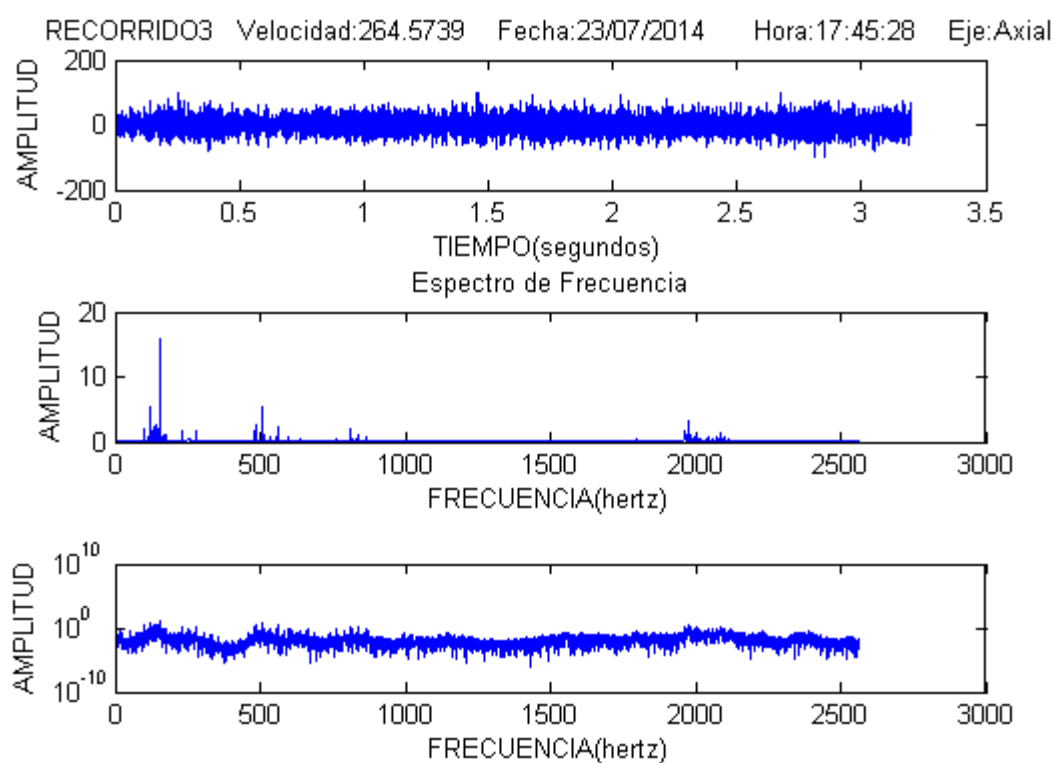
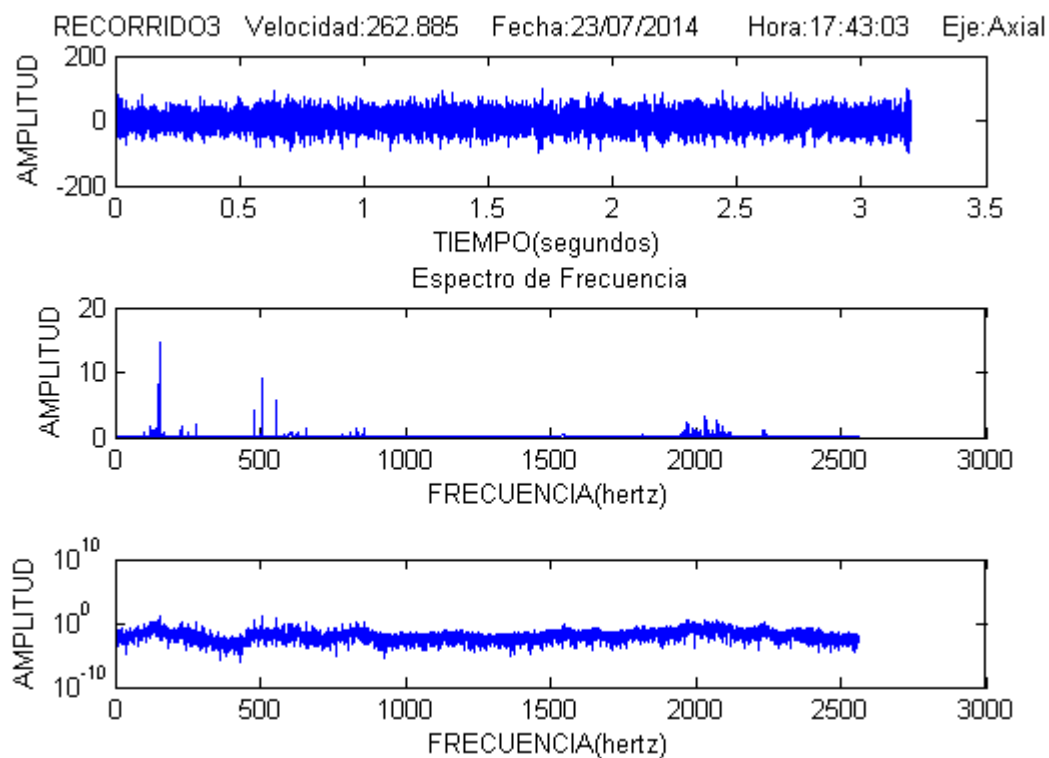


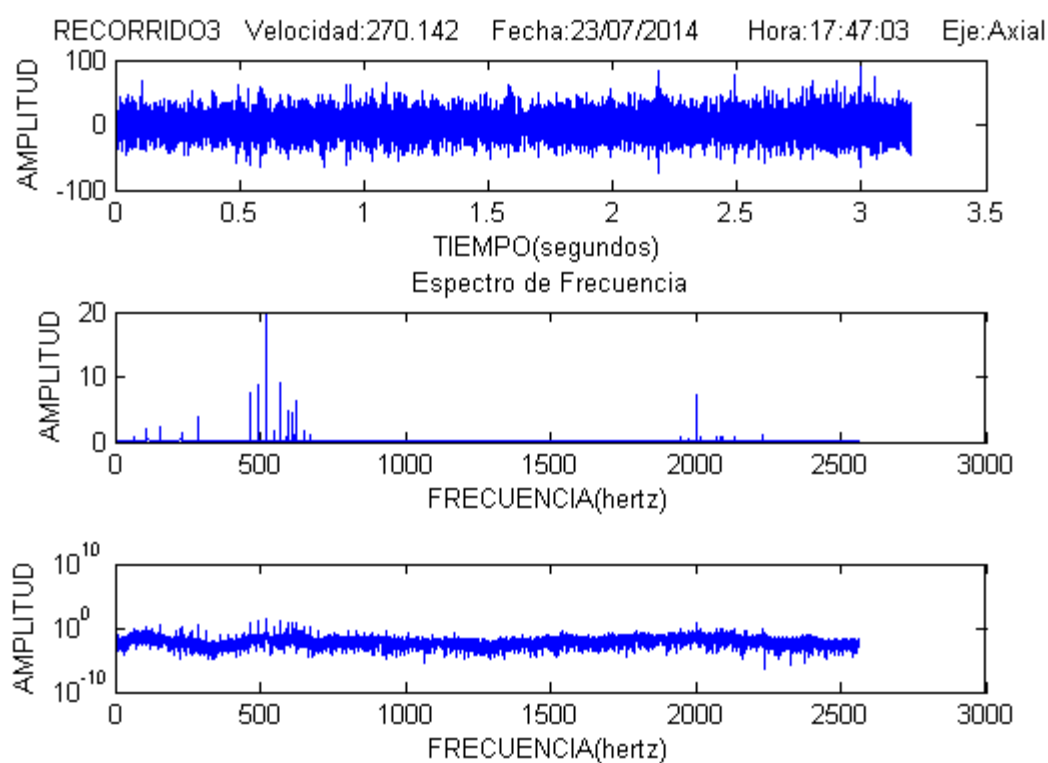
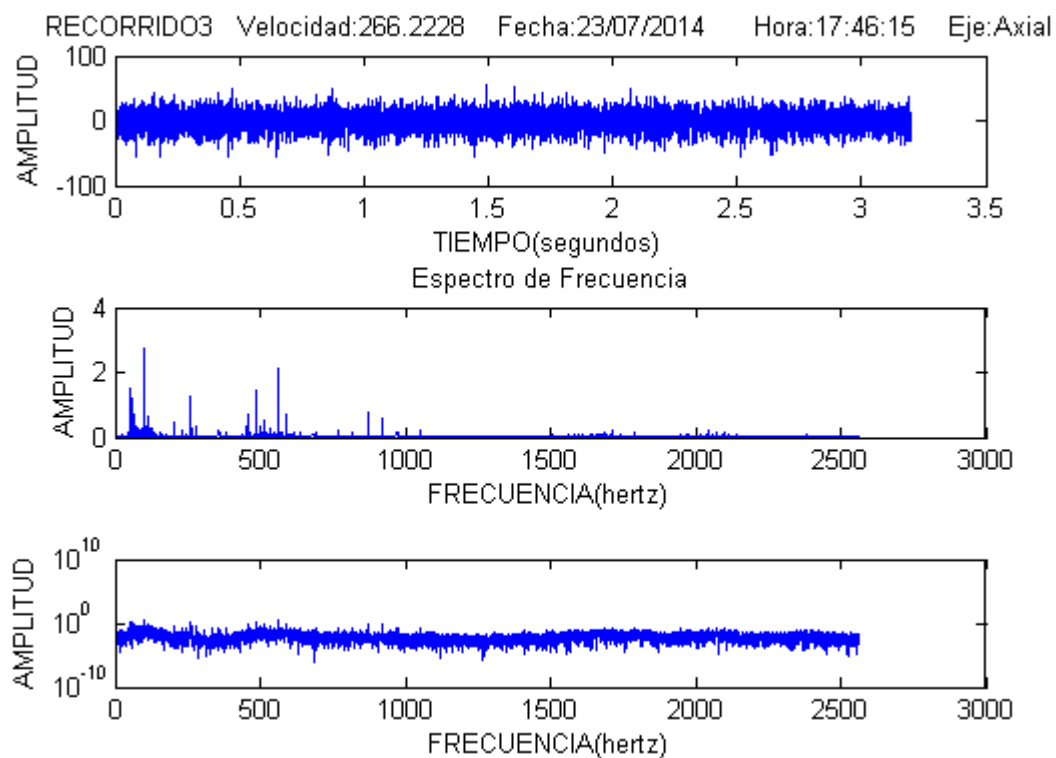


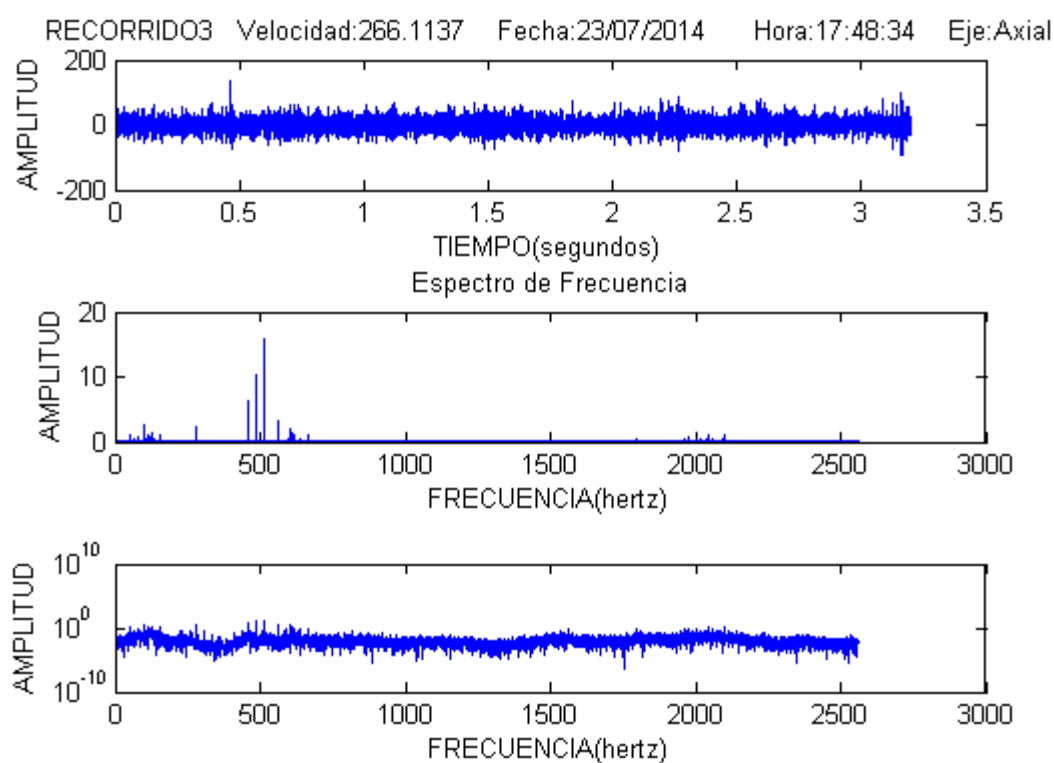
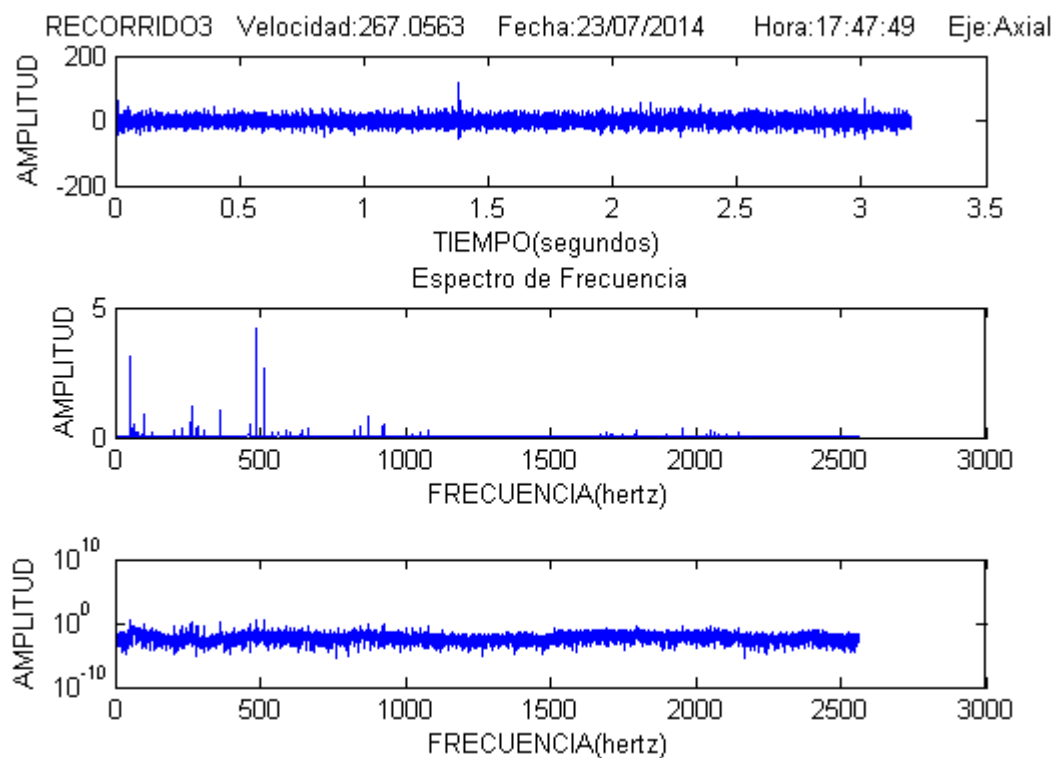


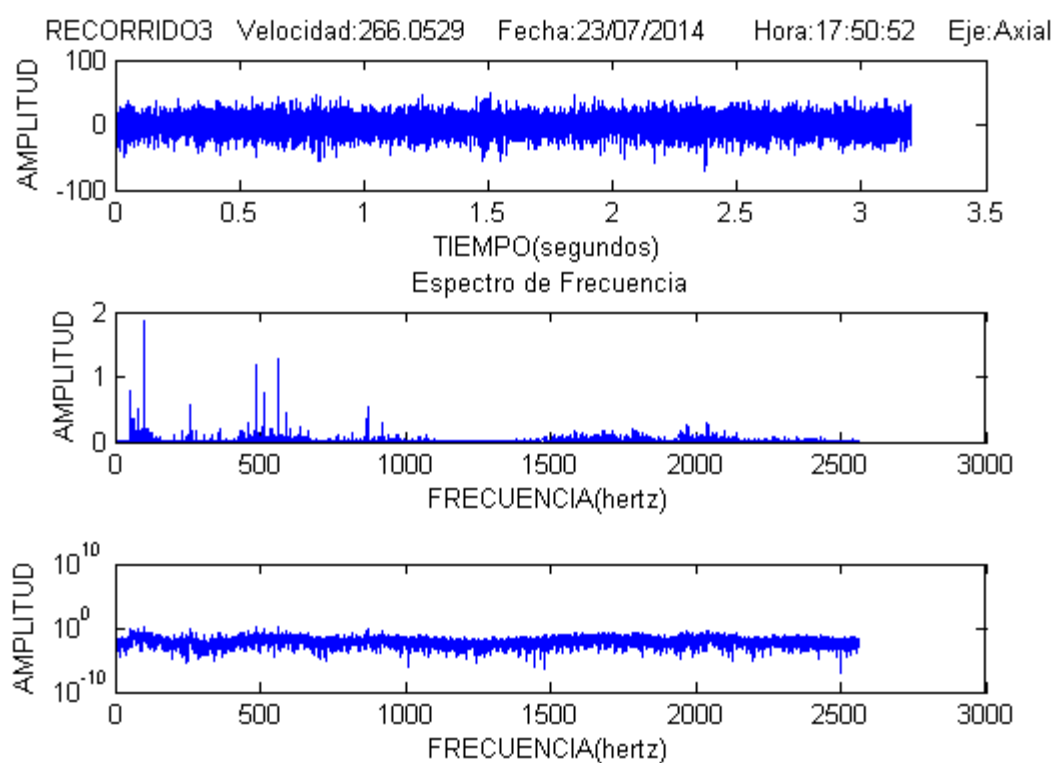
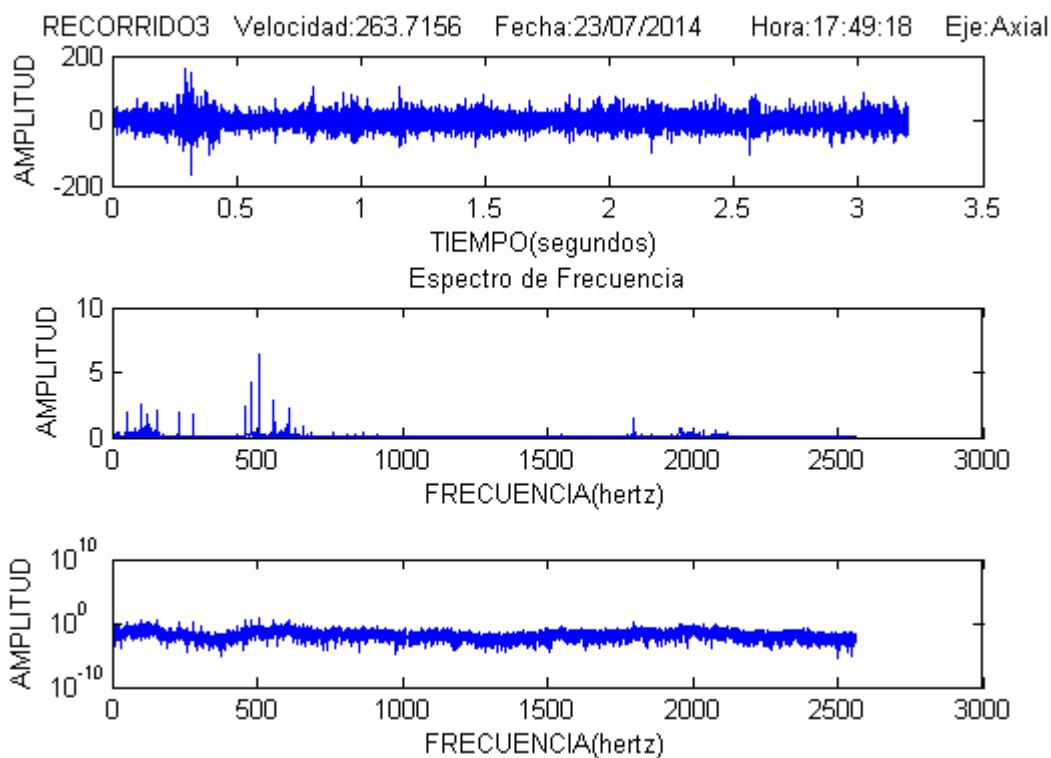


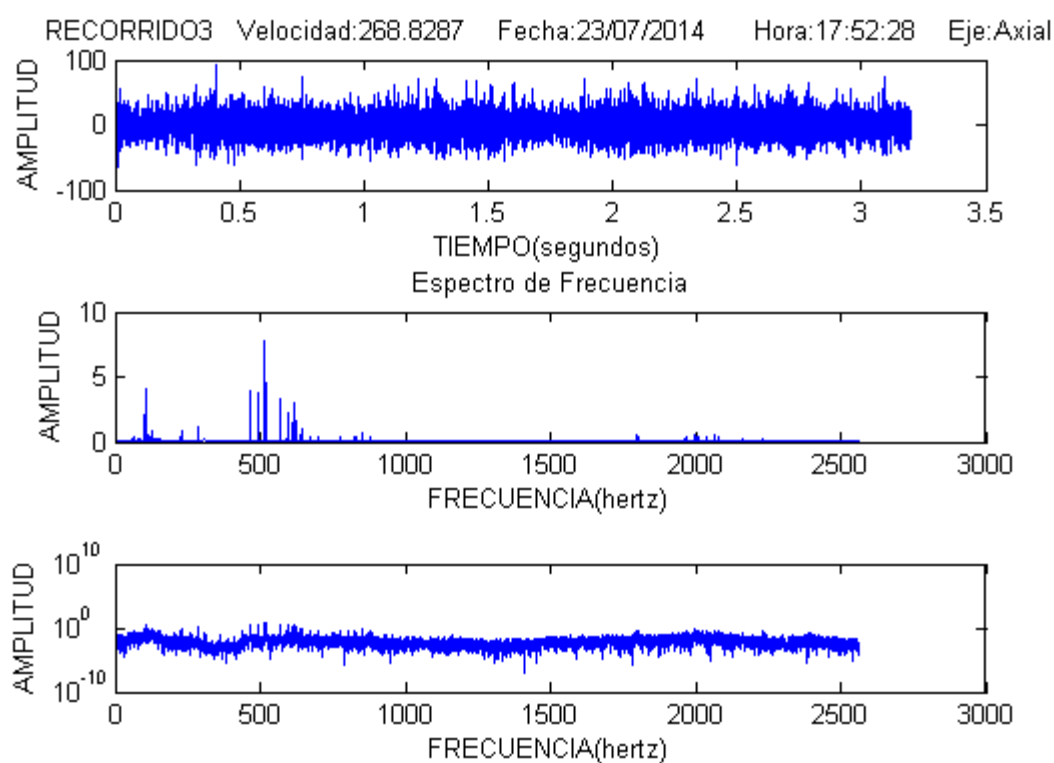
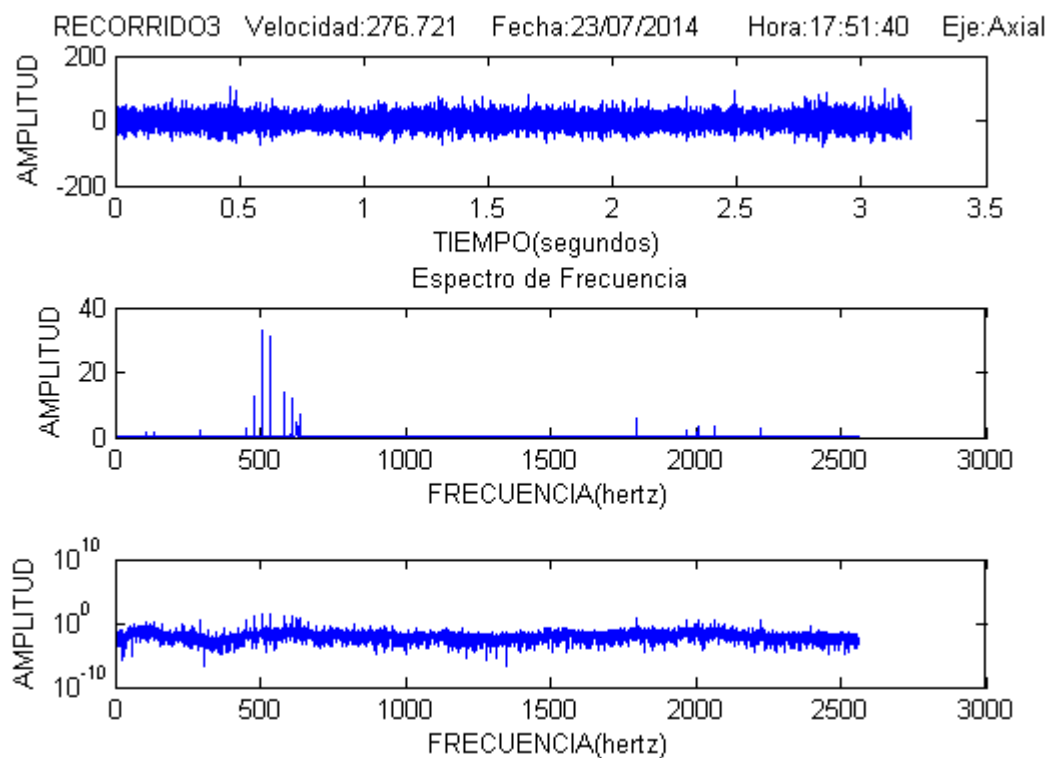


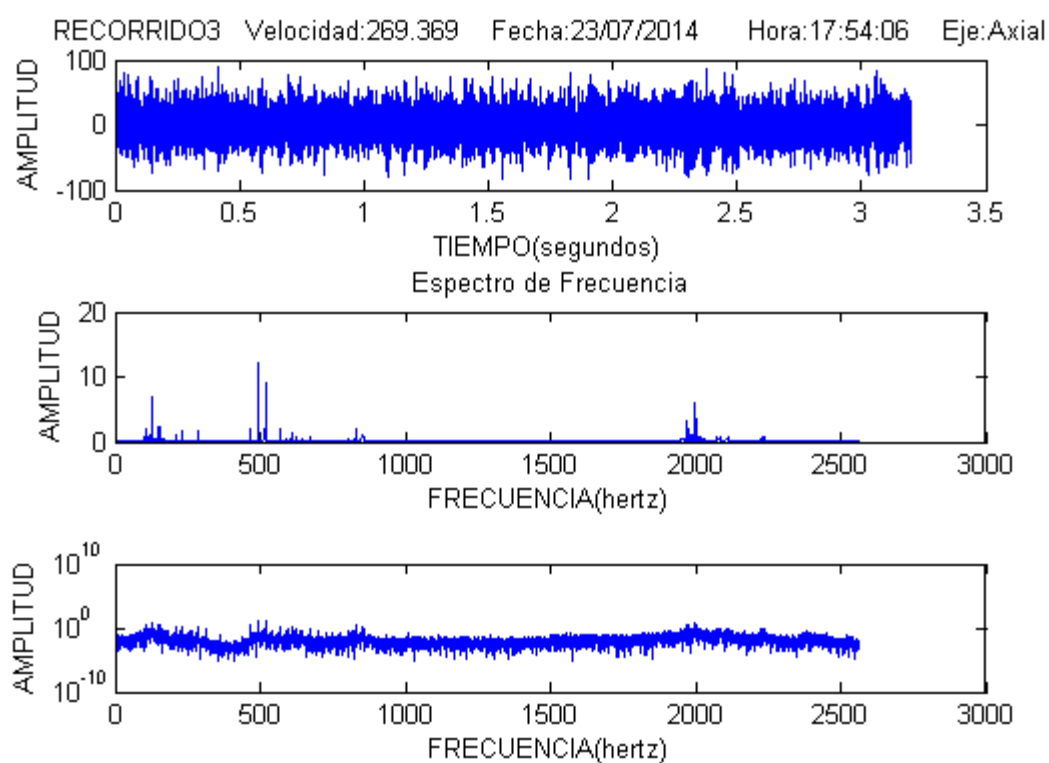
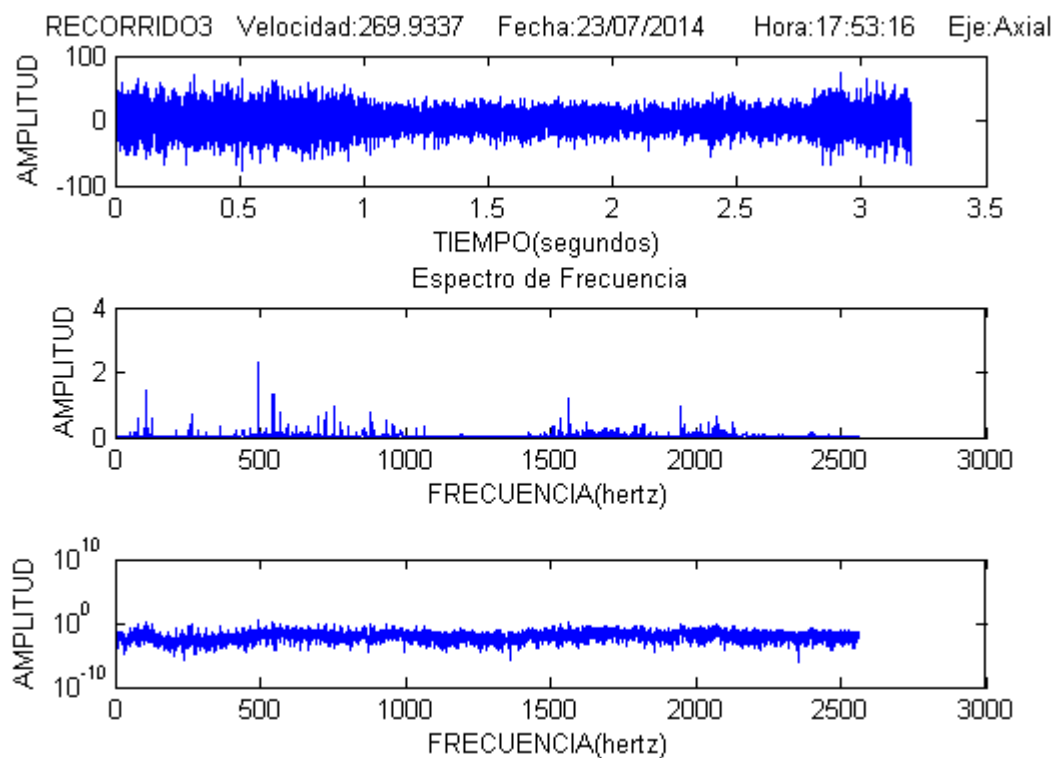


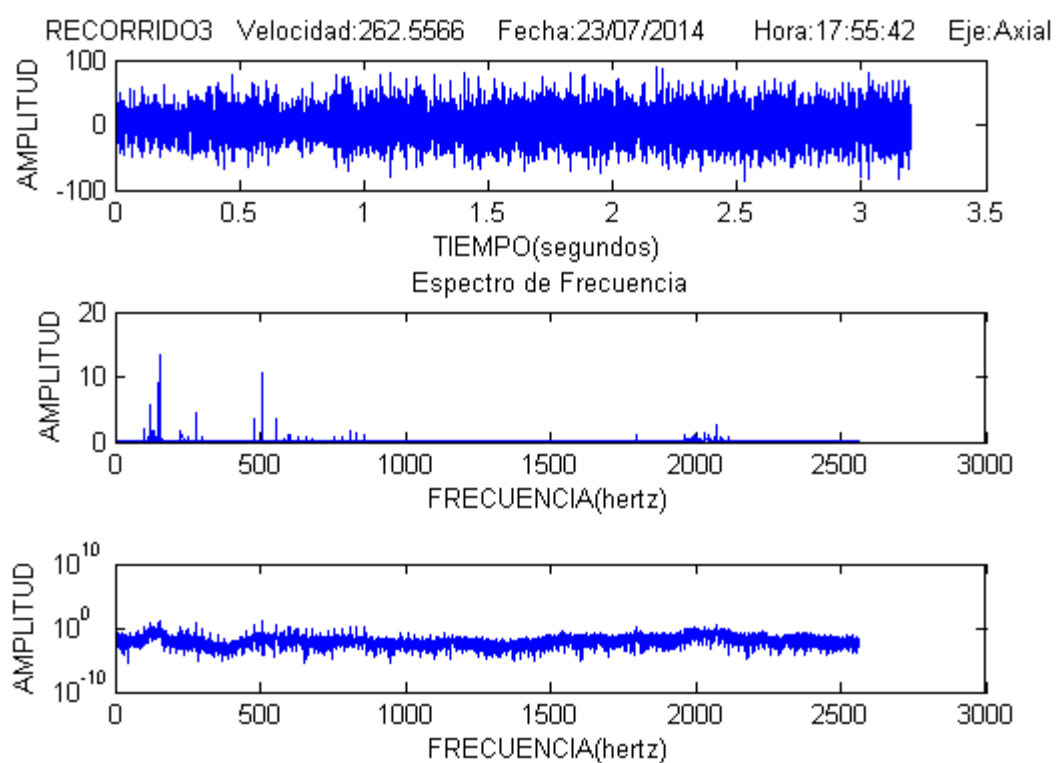
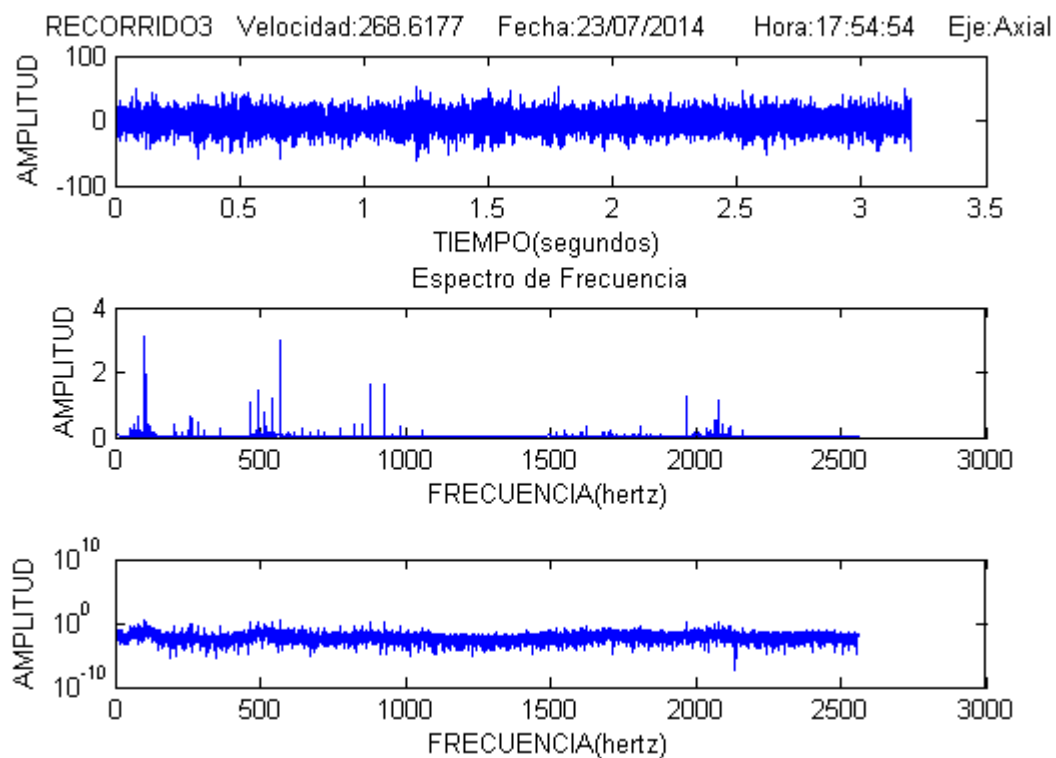


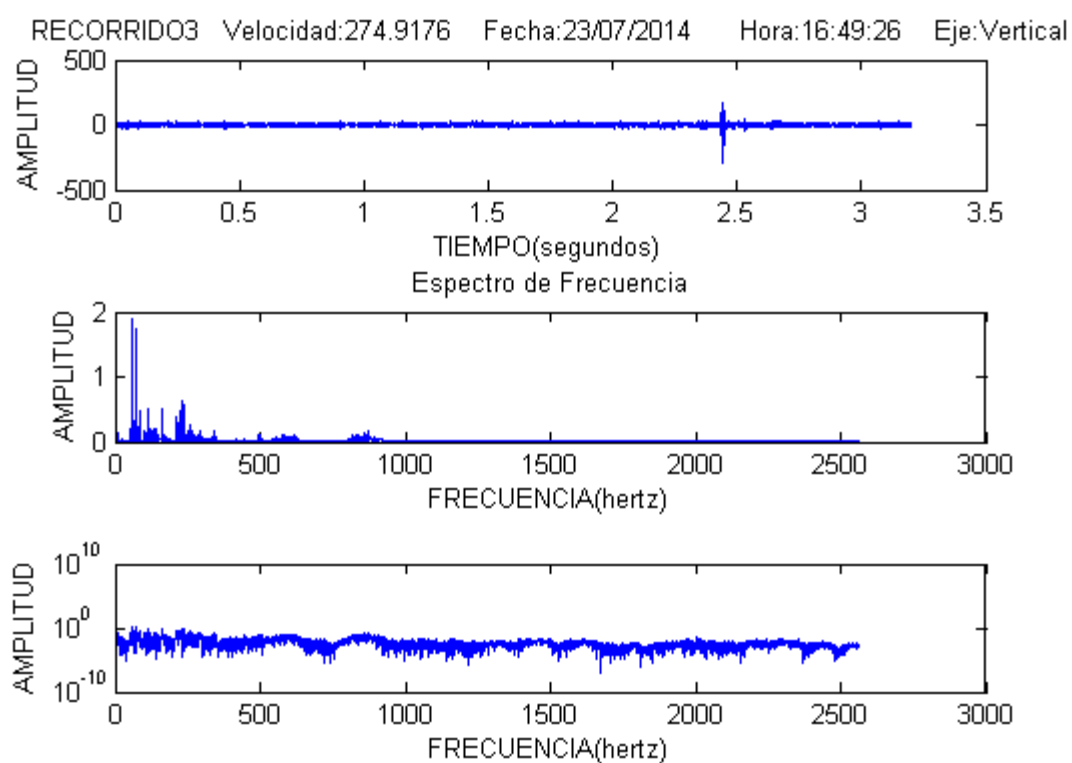
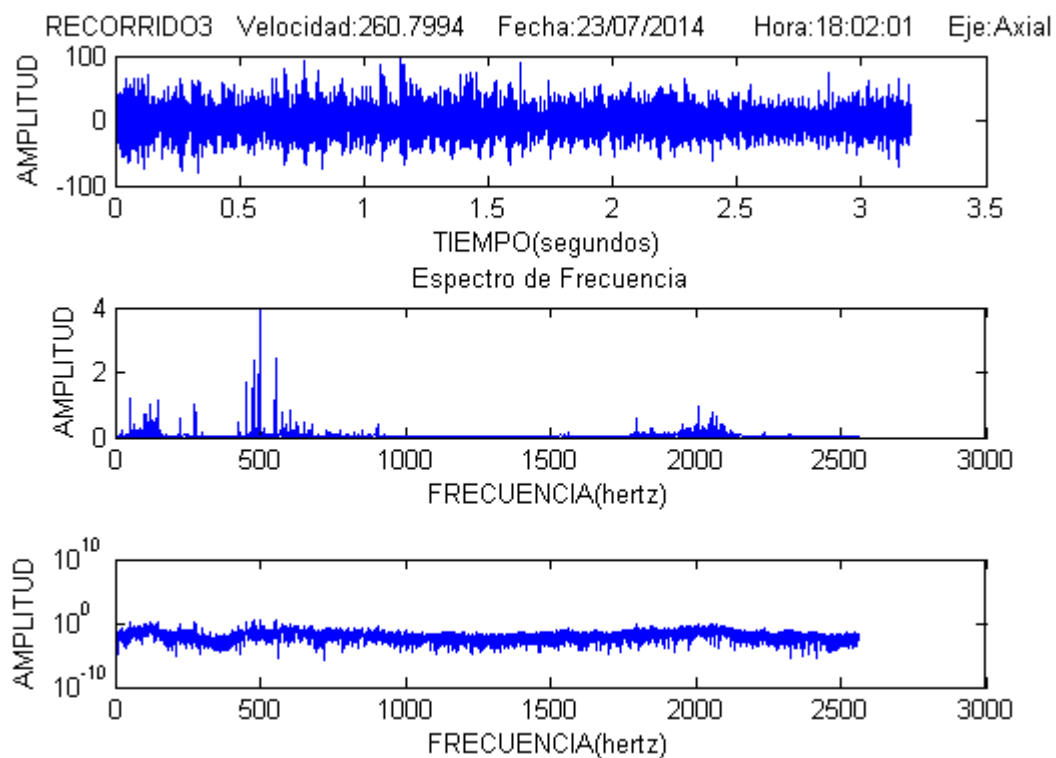




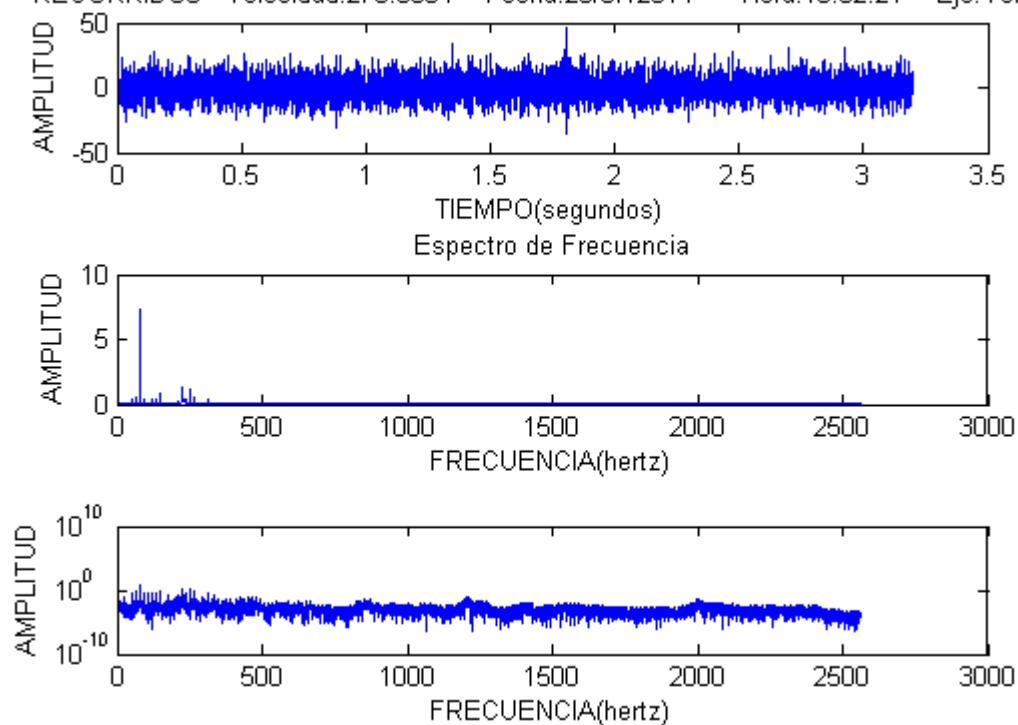




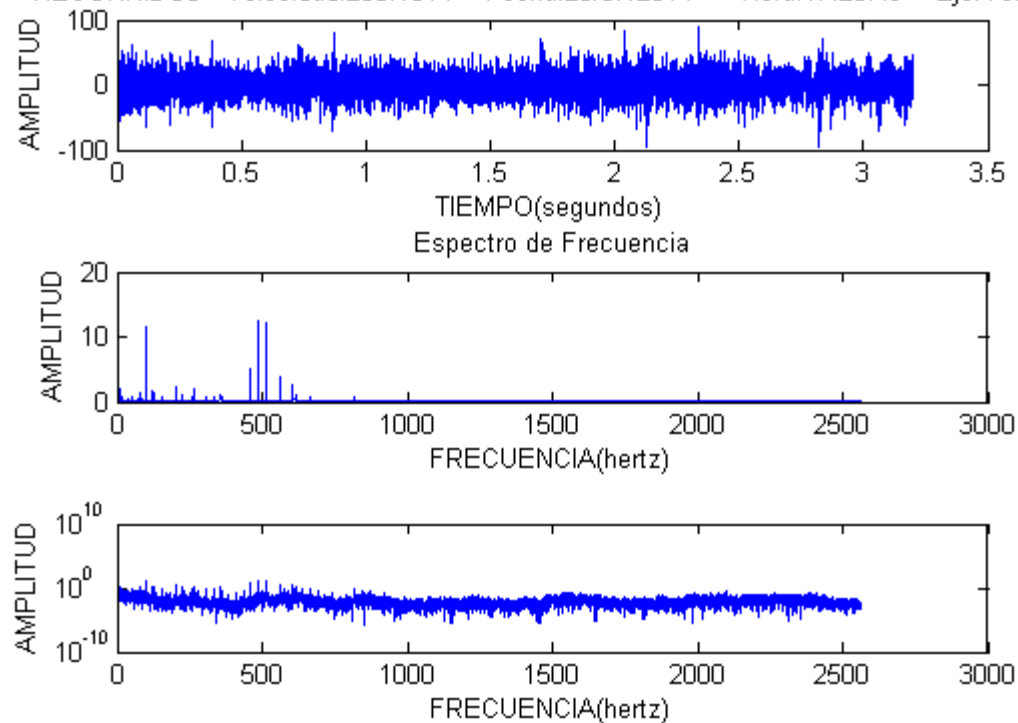




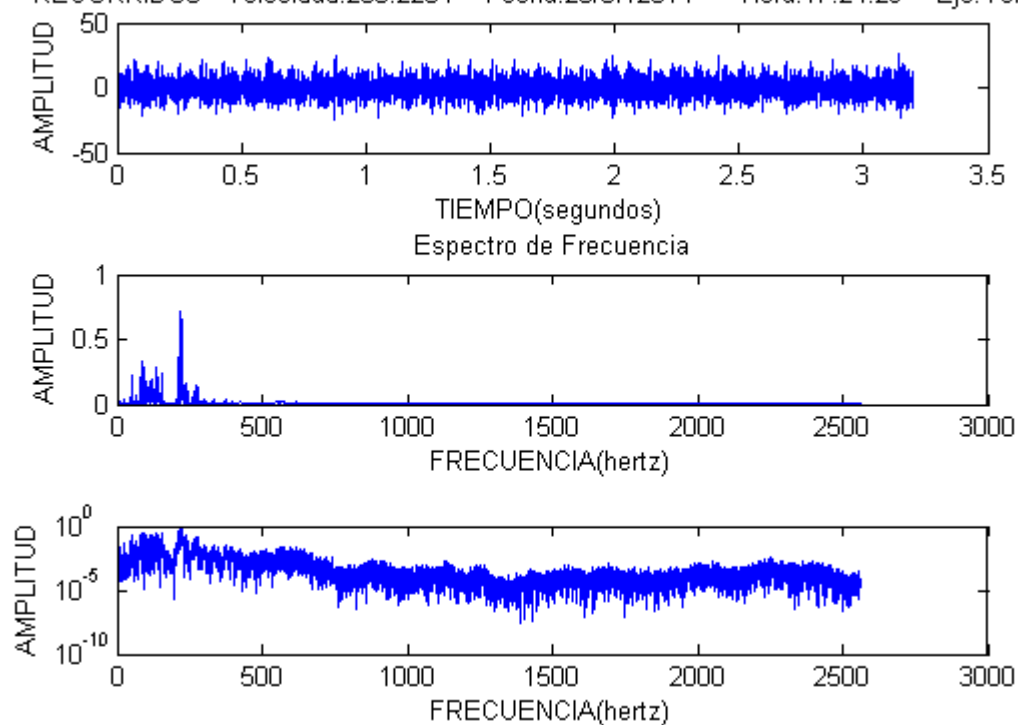
RECORRIDO3 Velocidad:276.0334 Fecha:23/07/2014 Hora:16:52:21 Eje:Vertical



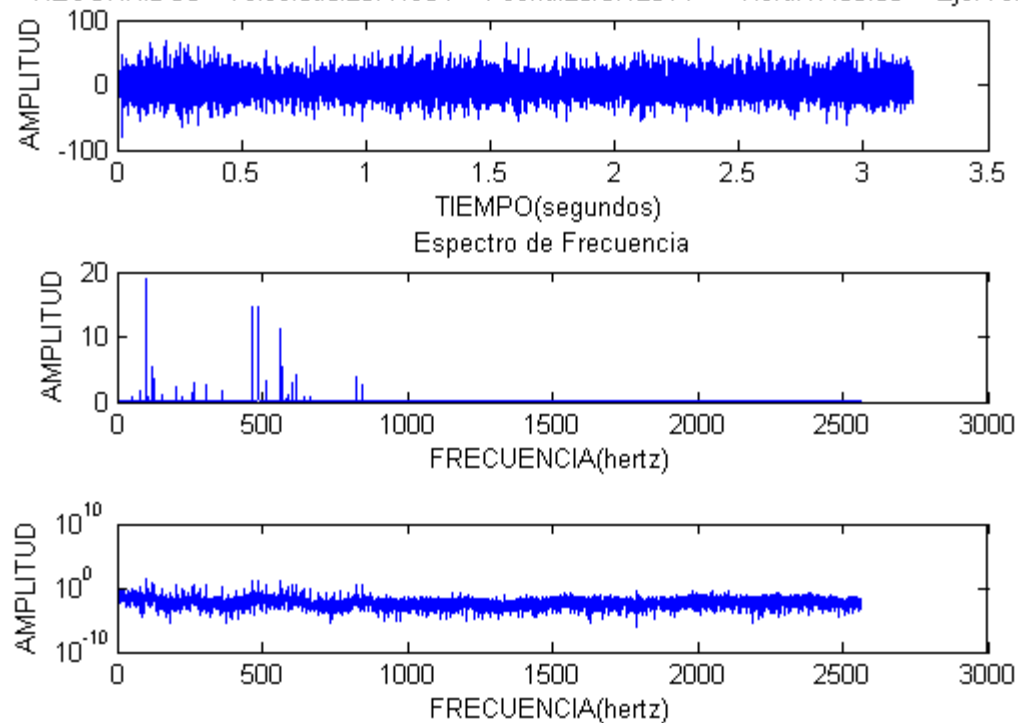
RECORRIDO3 Velocidad:266.1014 Fecha:23/07/2014 Hora:17:20:49 Eje:Vertical

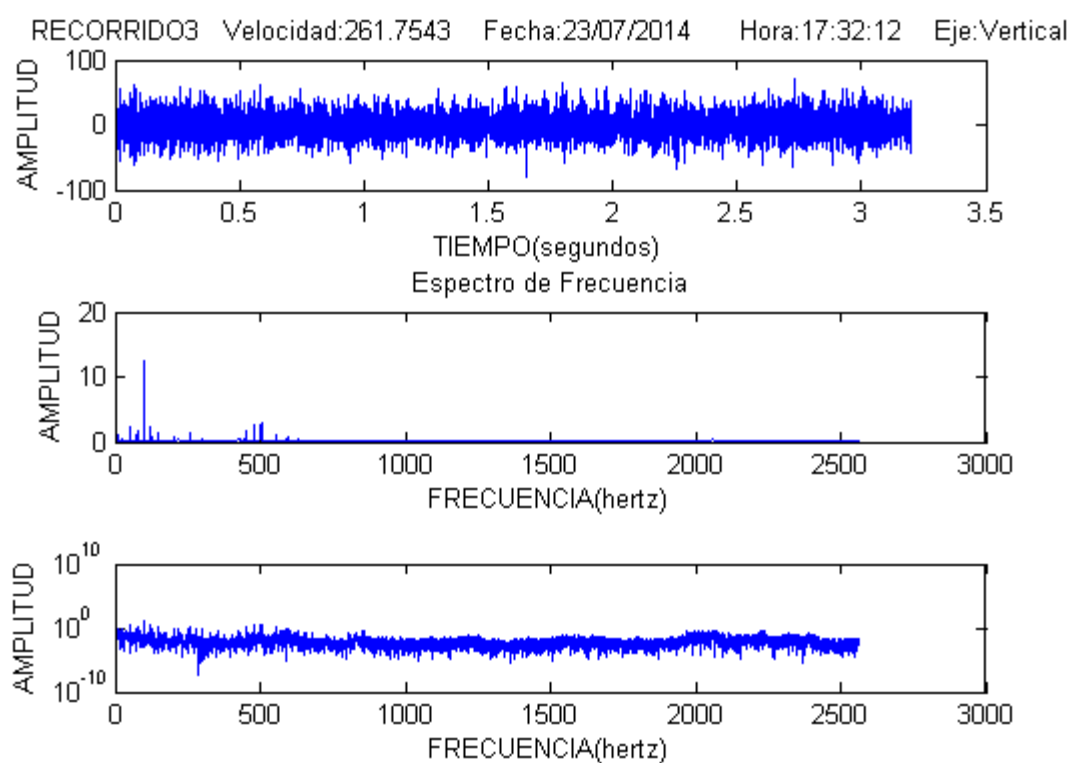
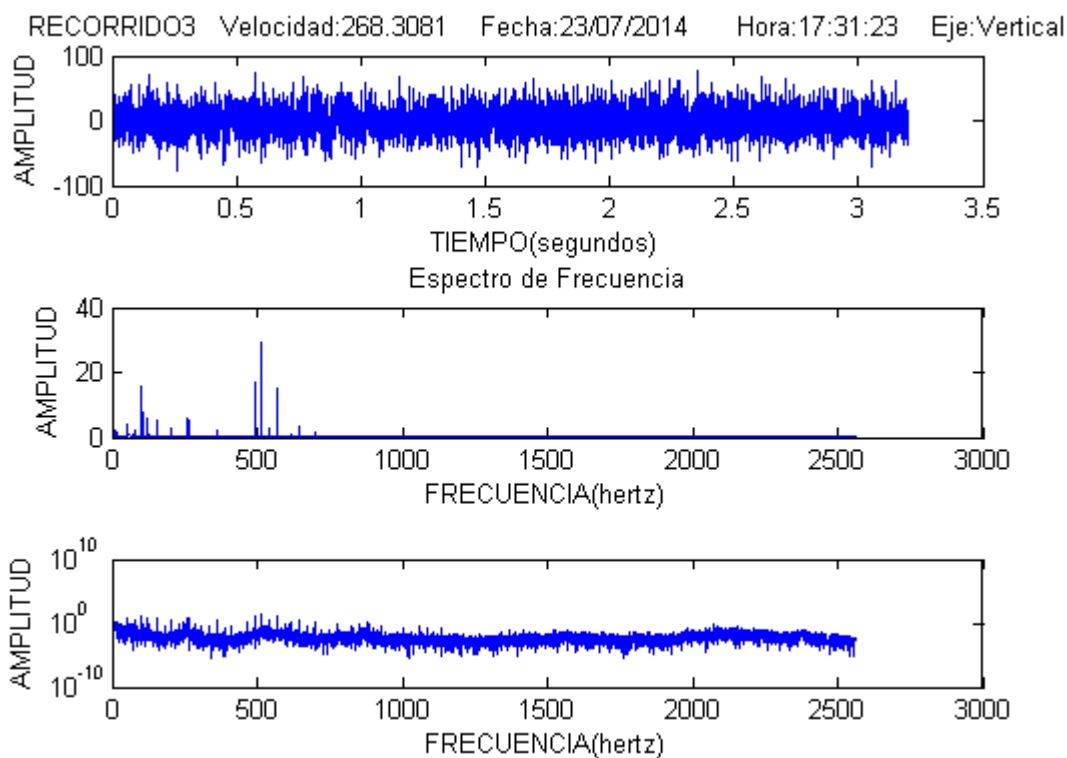


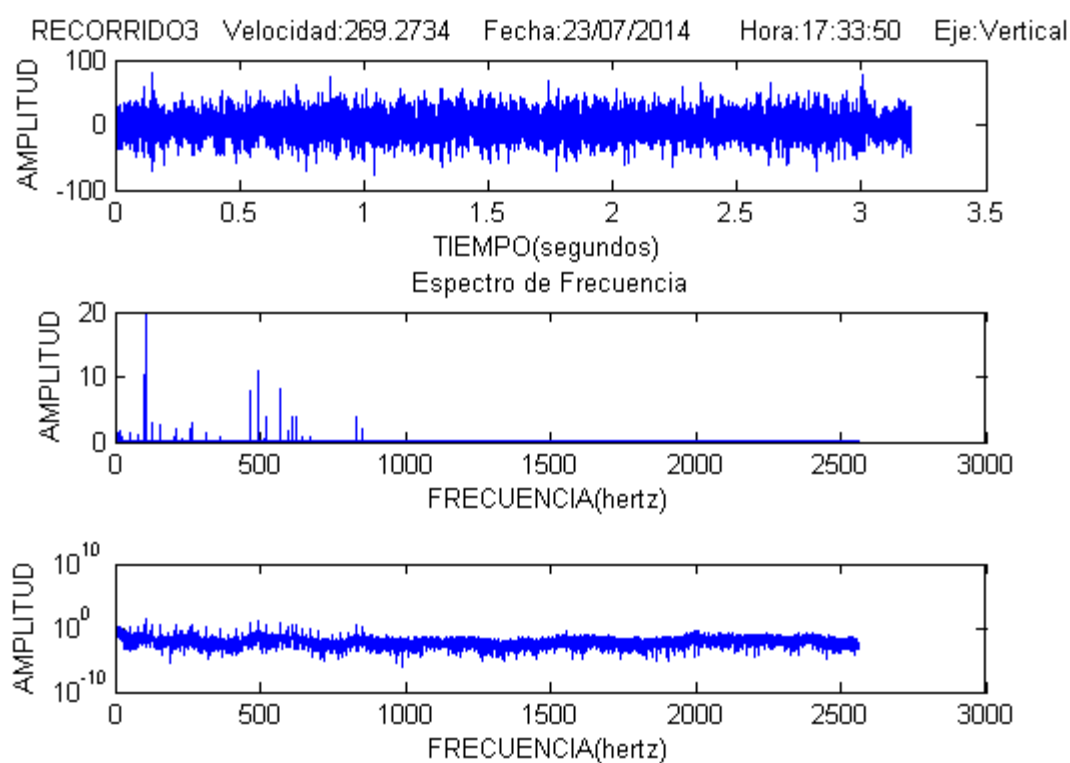
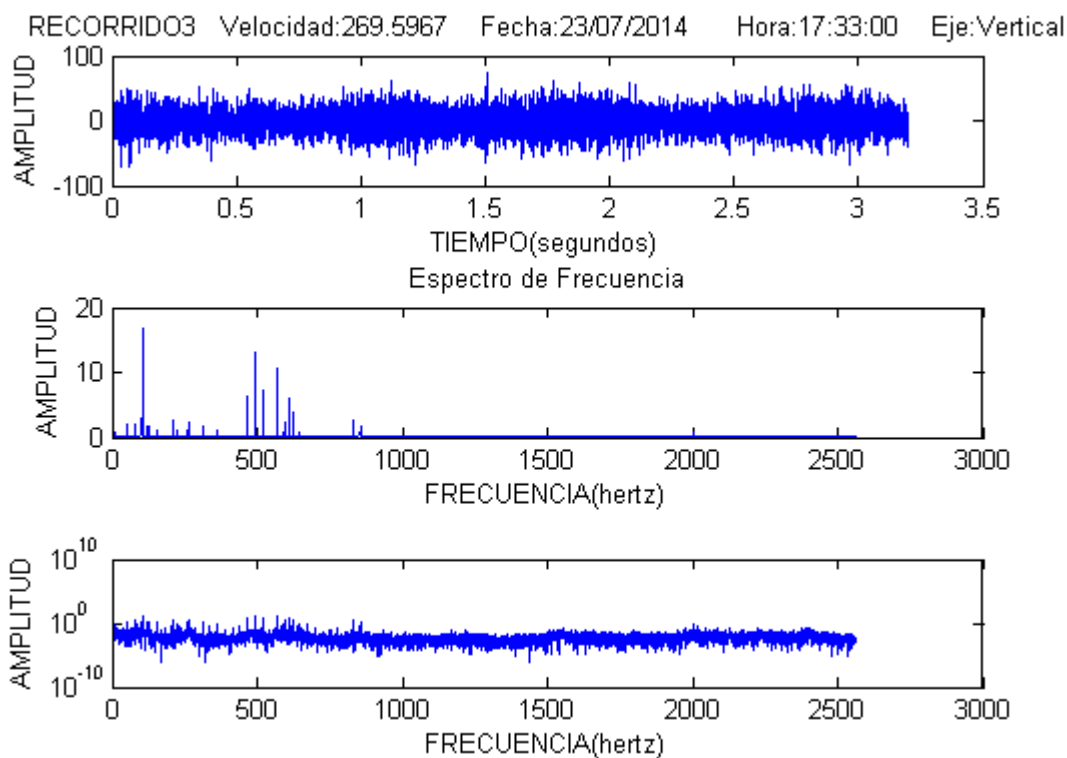
RECORRIDO3 Velocidad:260.2234 Fecha:23/07/2014 Hora:17:24:29 Eje:Vertical

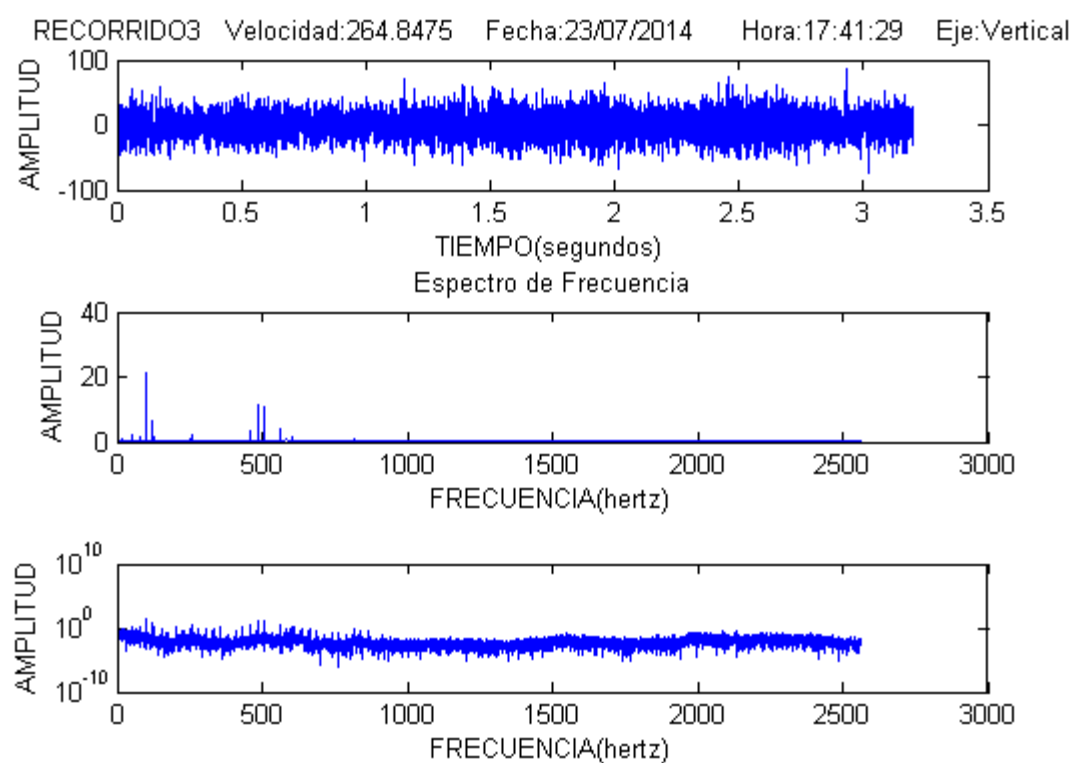
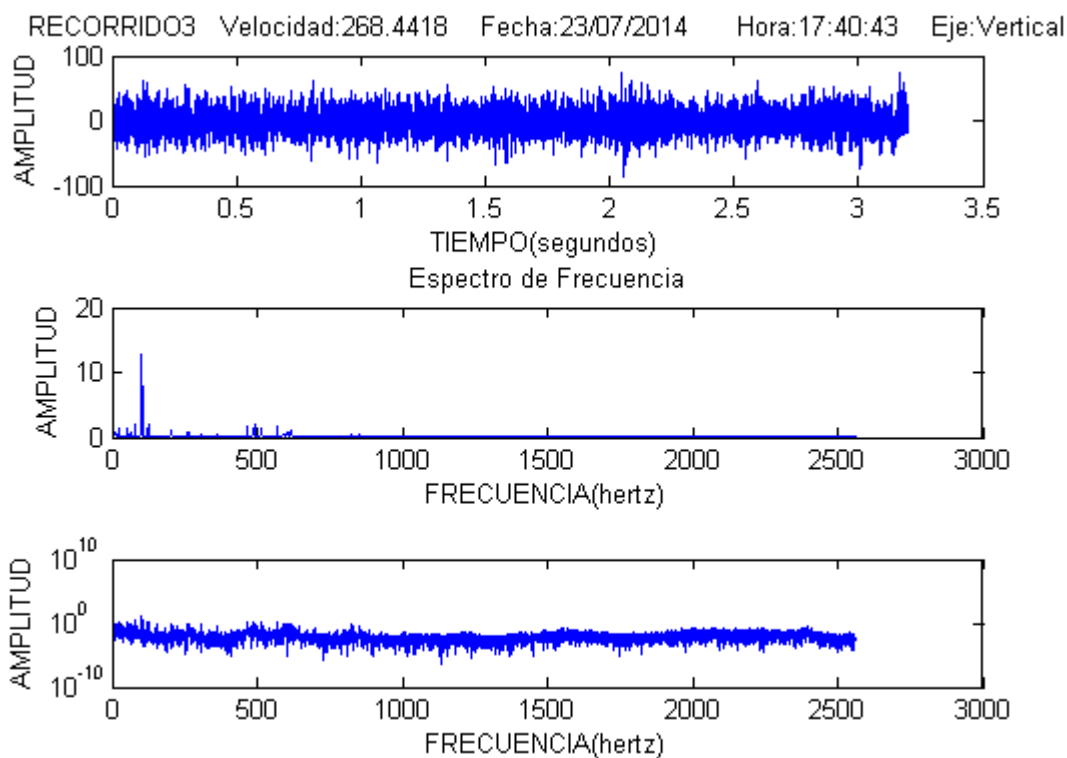


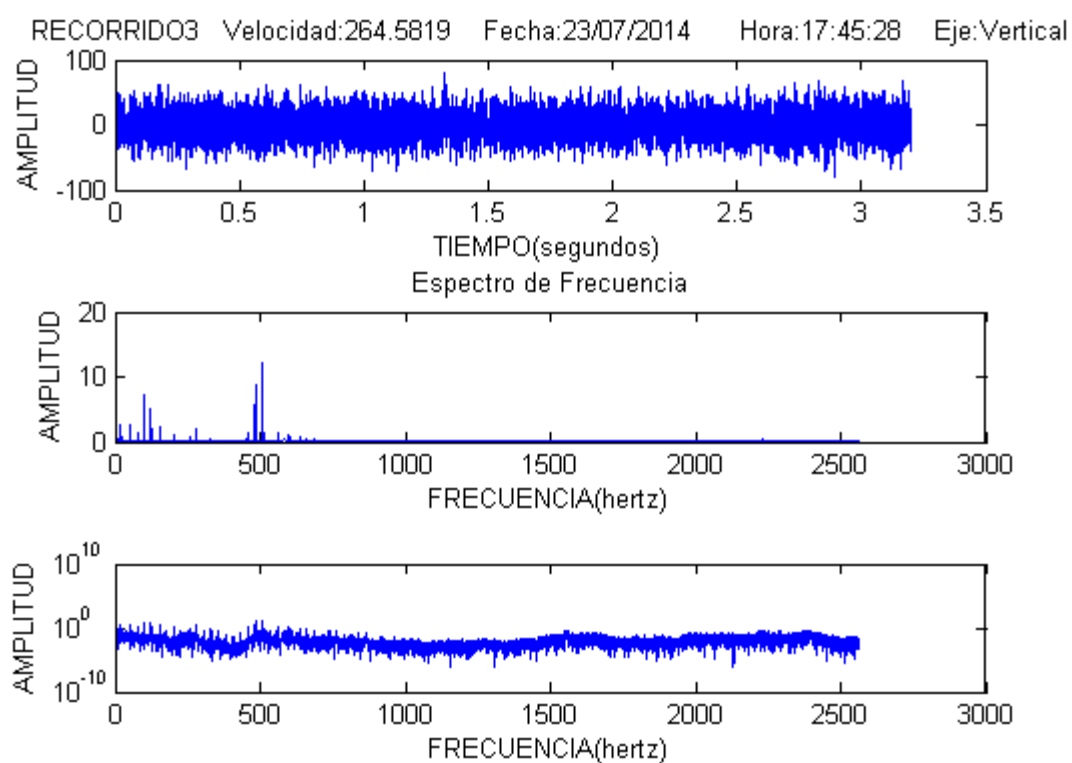
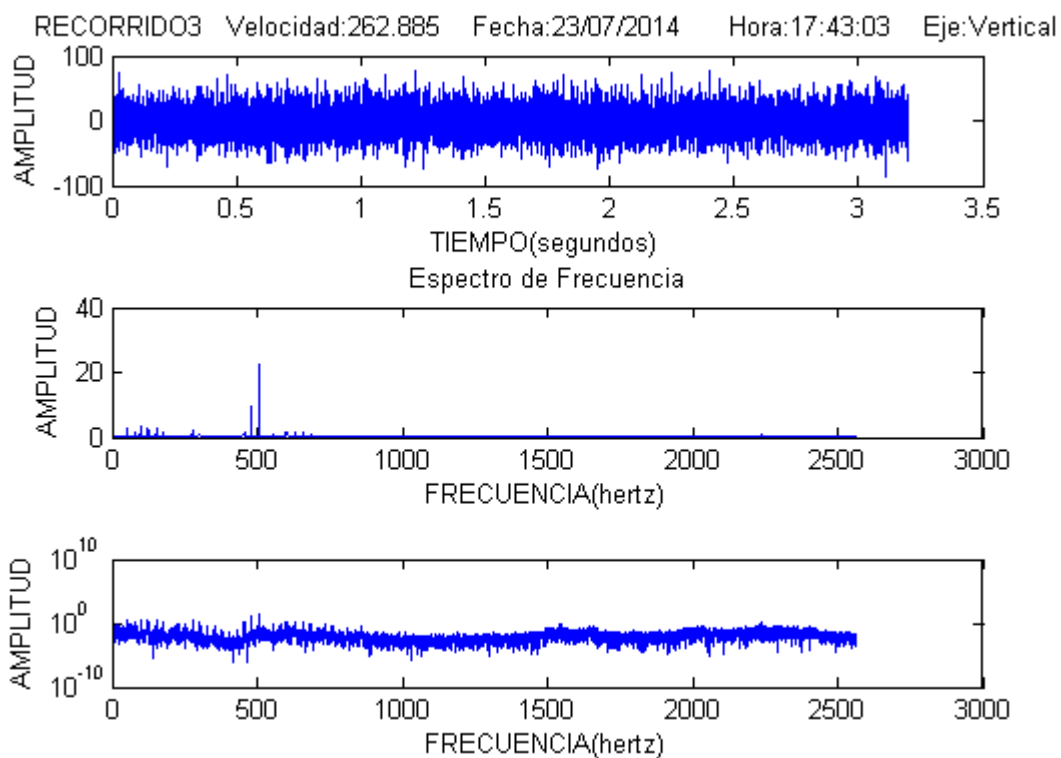
RECORRIDO3 Velocidad:267.1964 Fecha:23/07/2014 Hora:17:30:36 Eje:Vertical

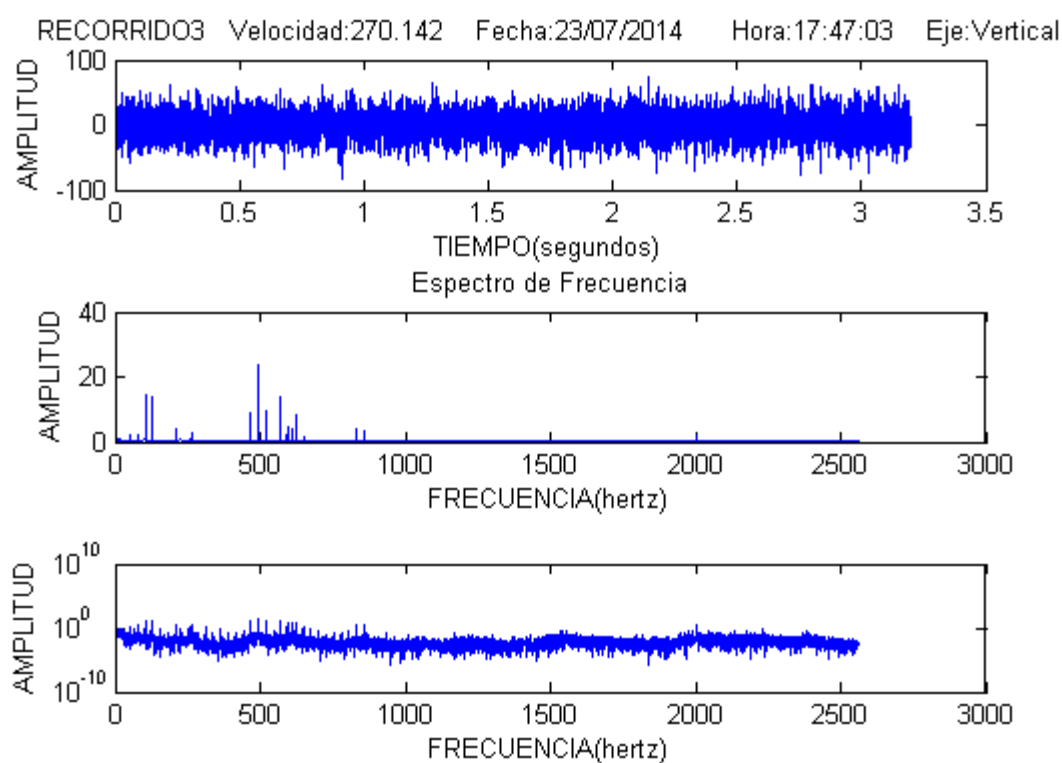
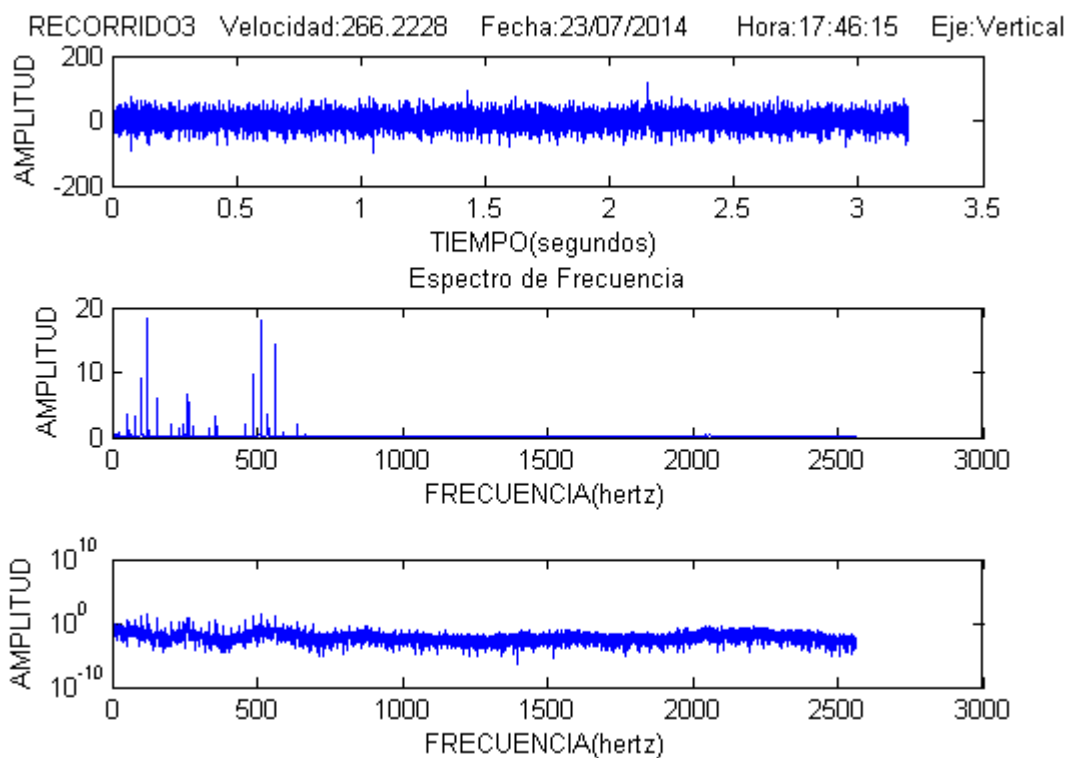


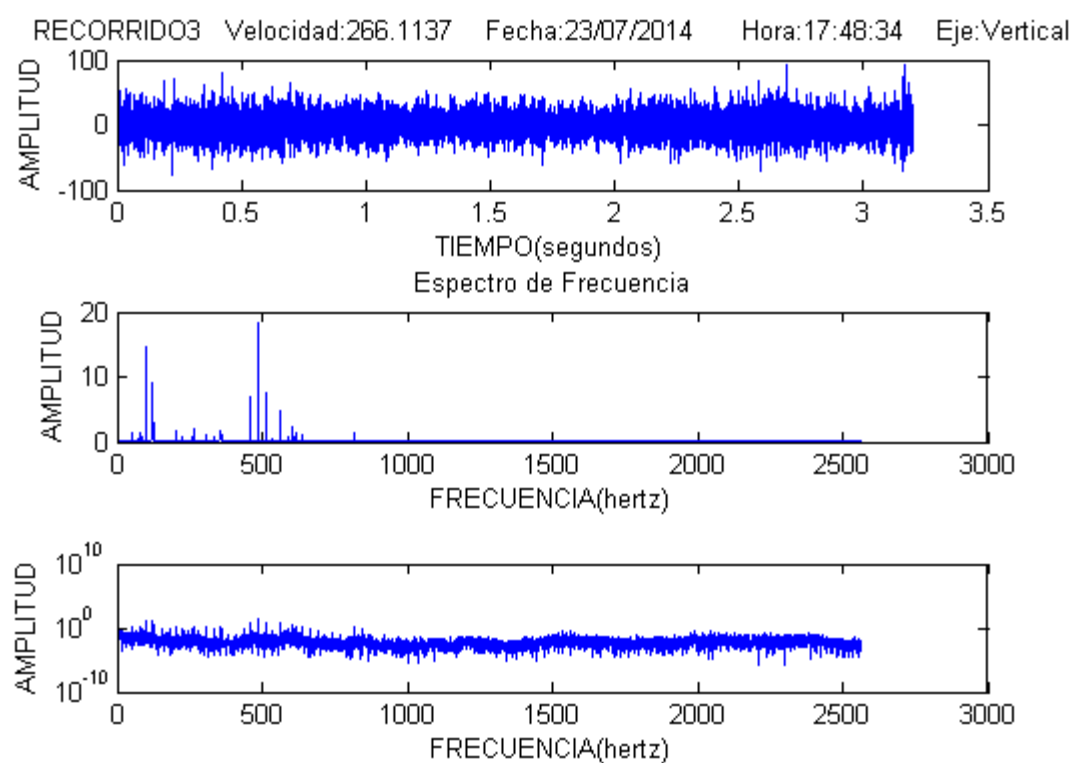
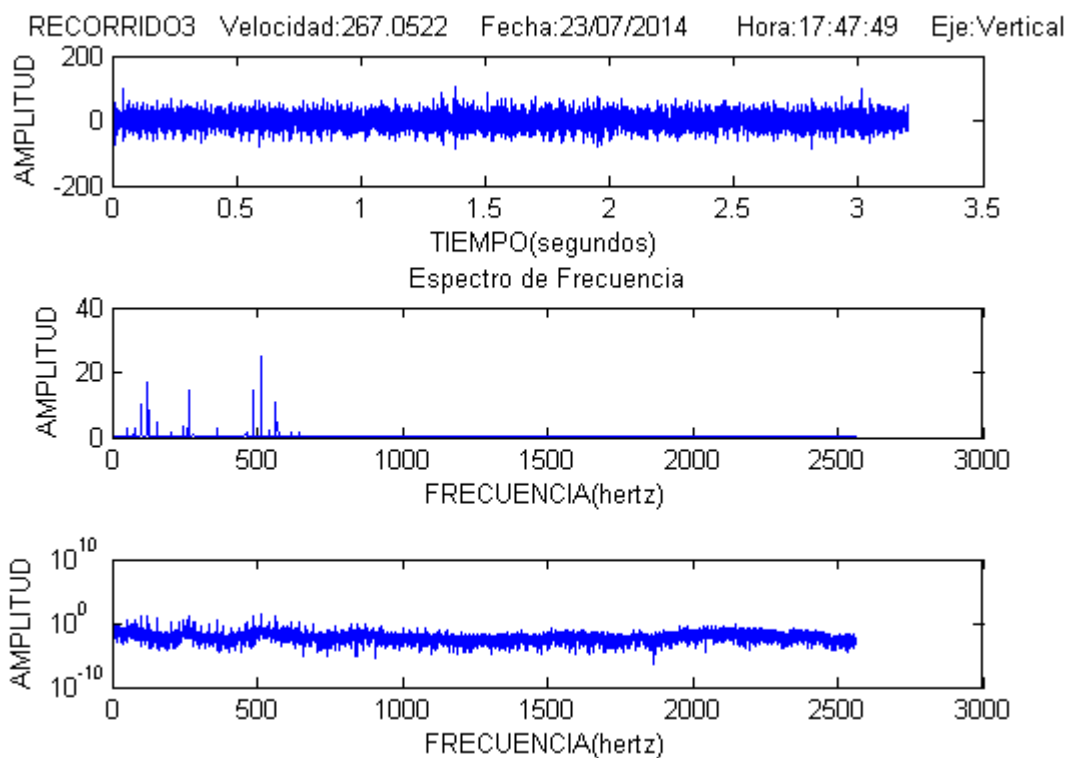


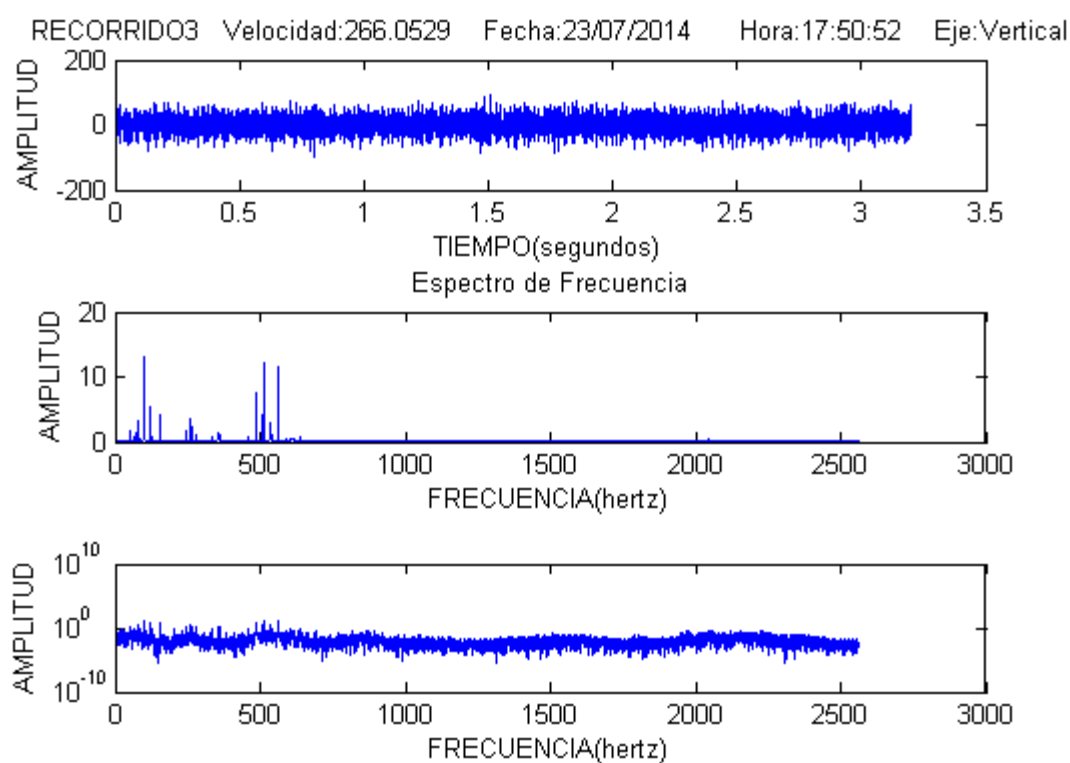
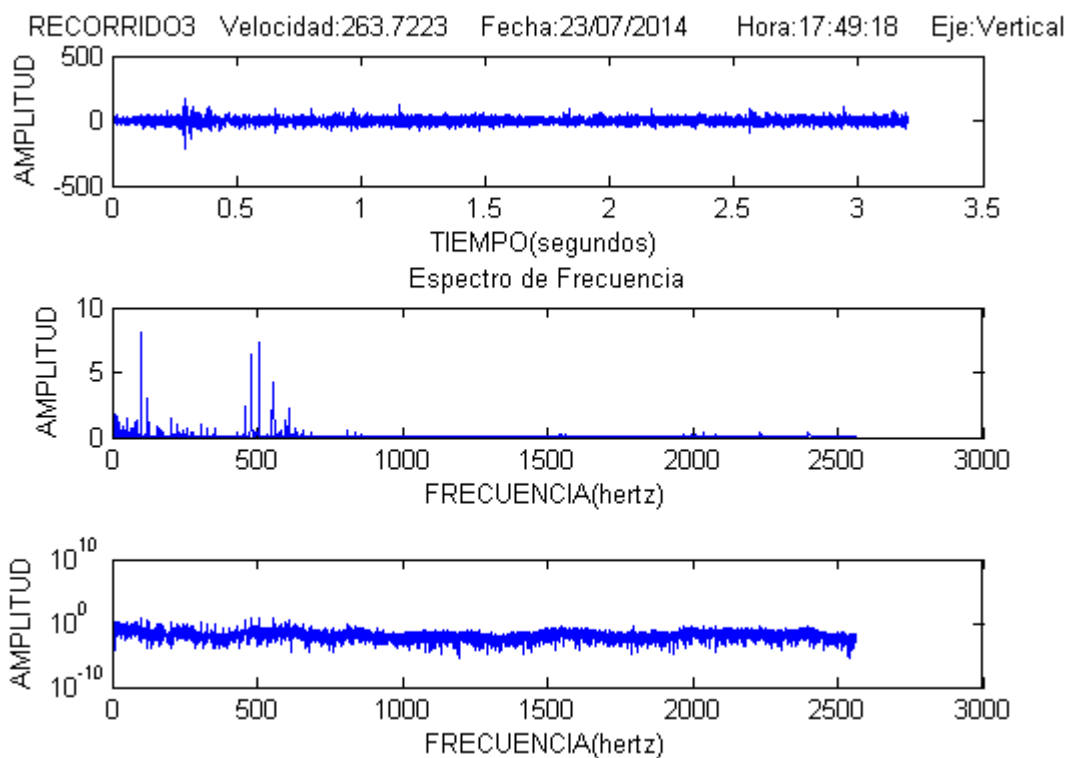


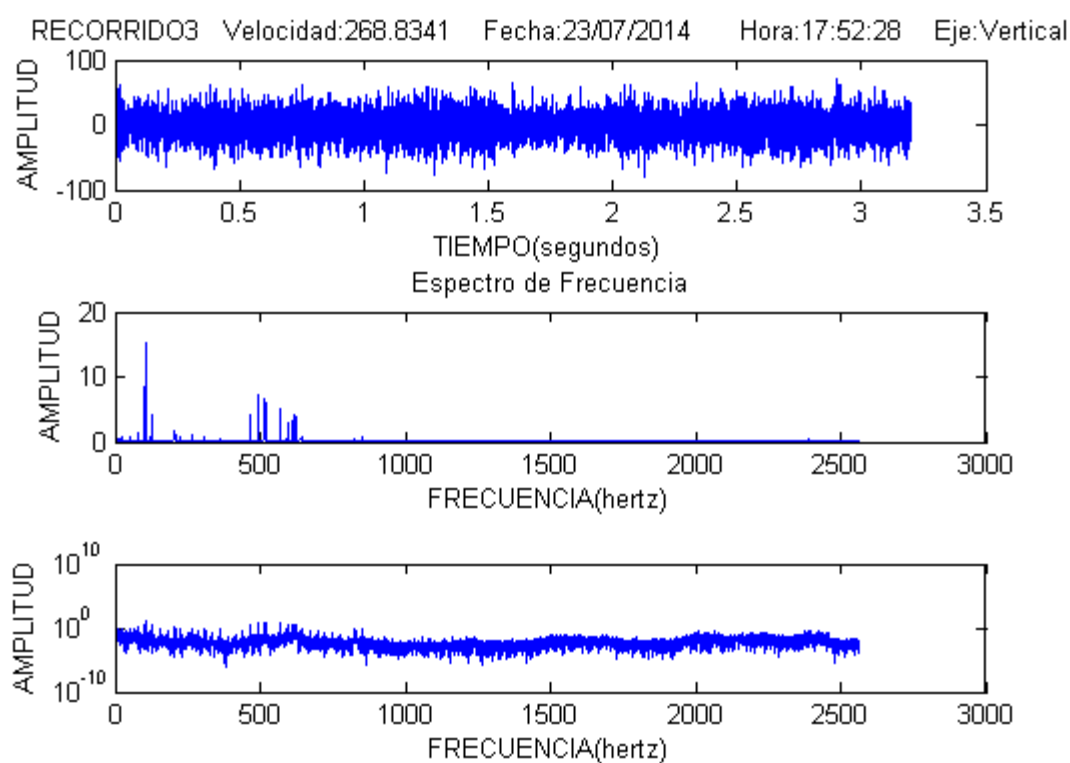
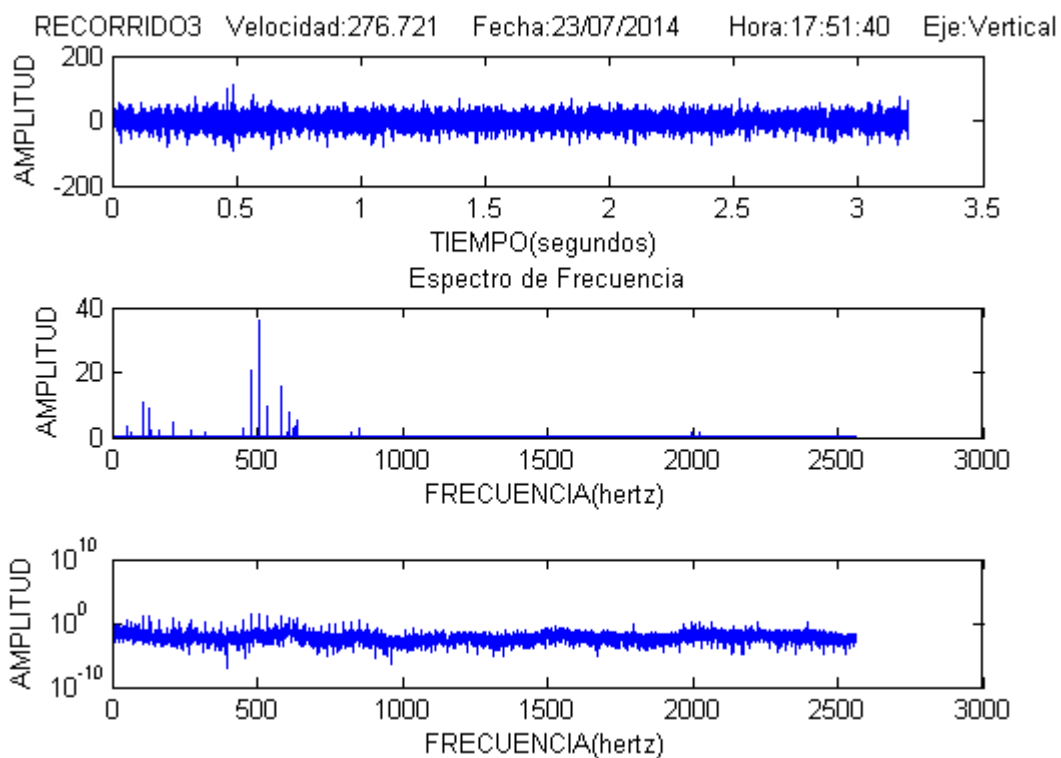


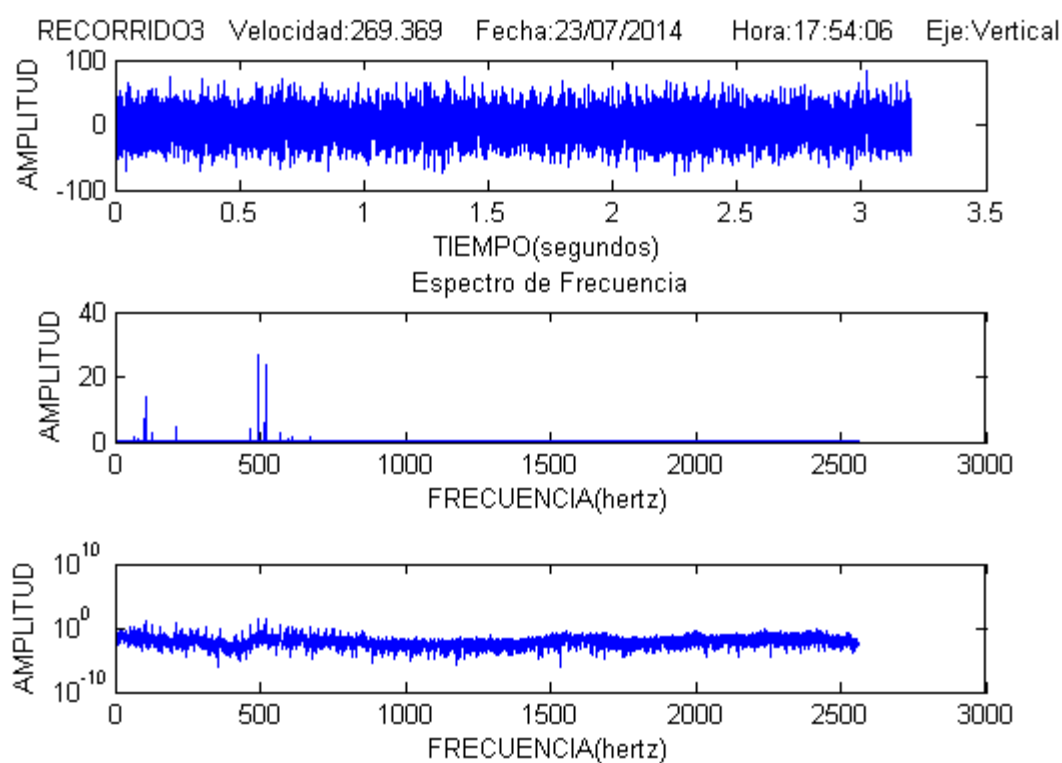
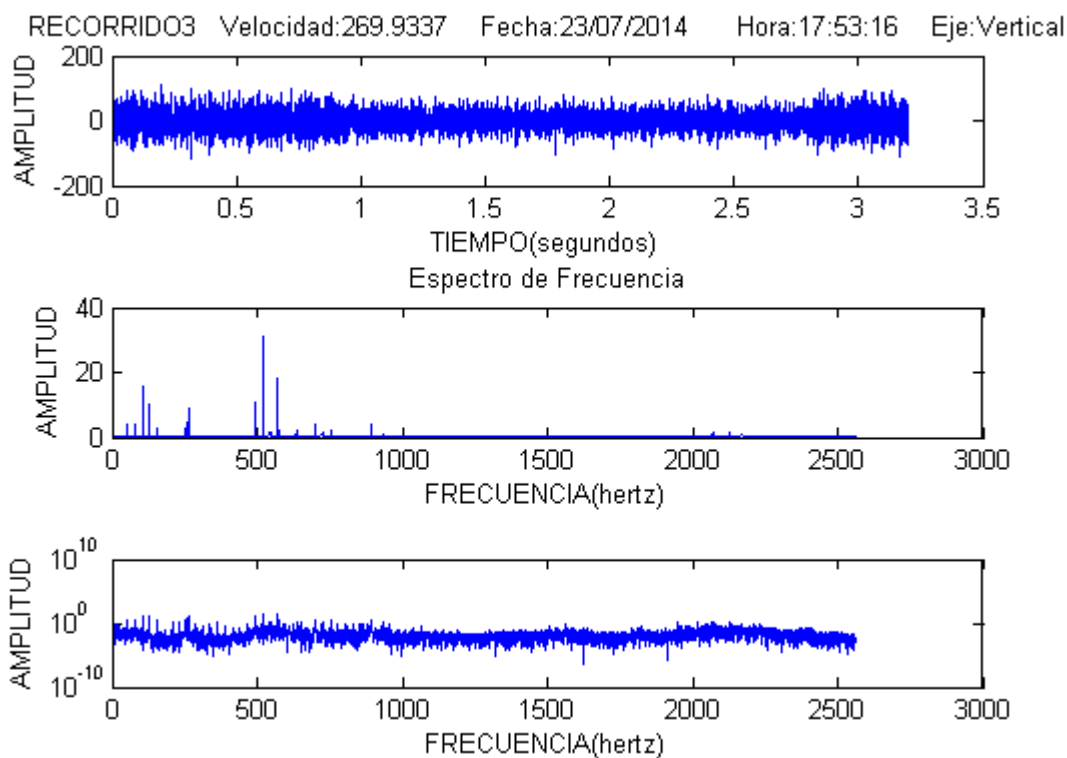


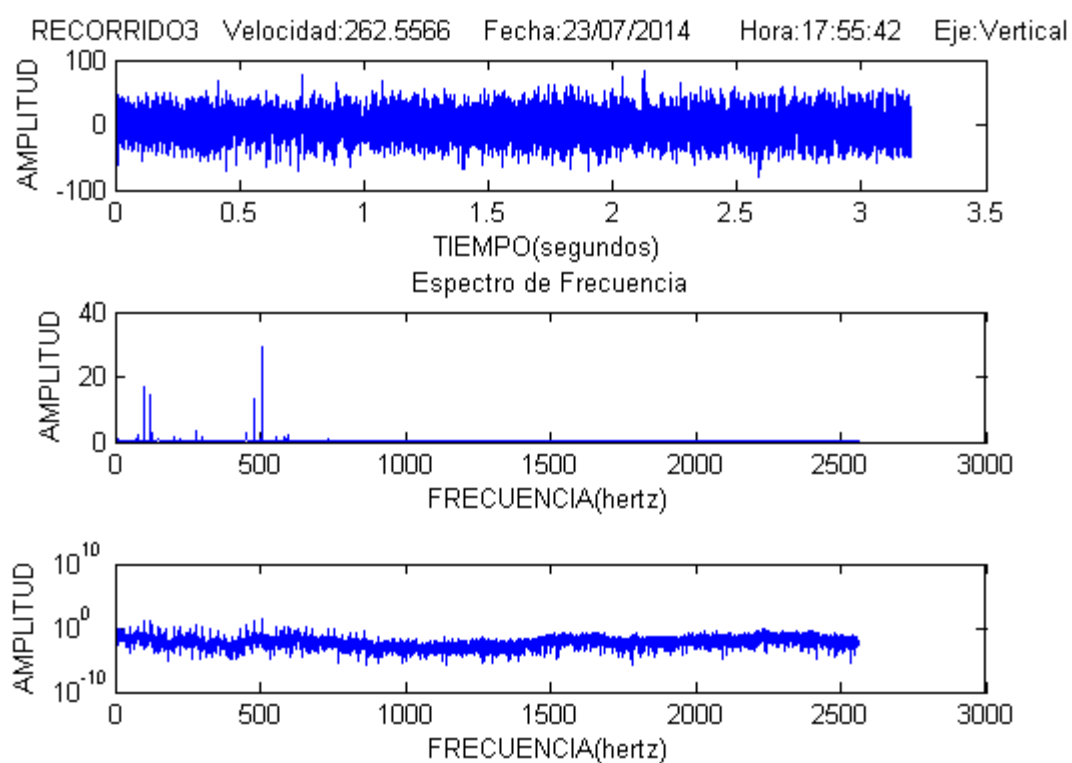
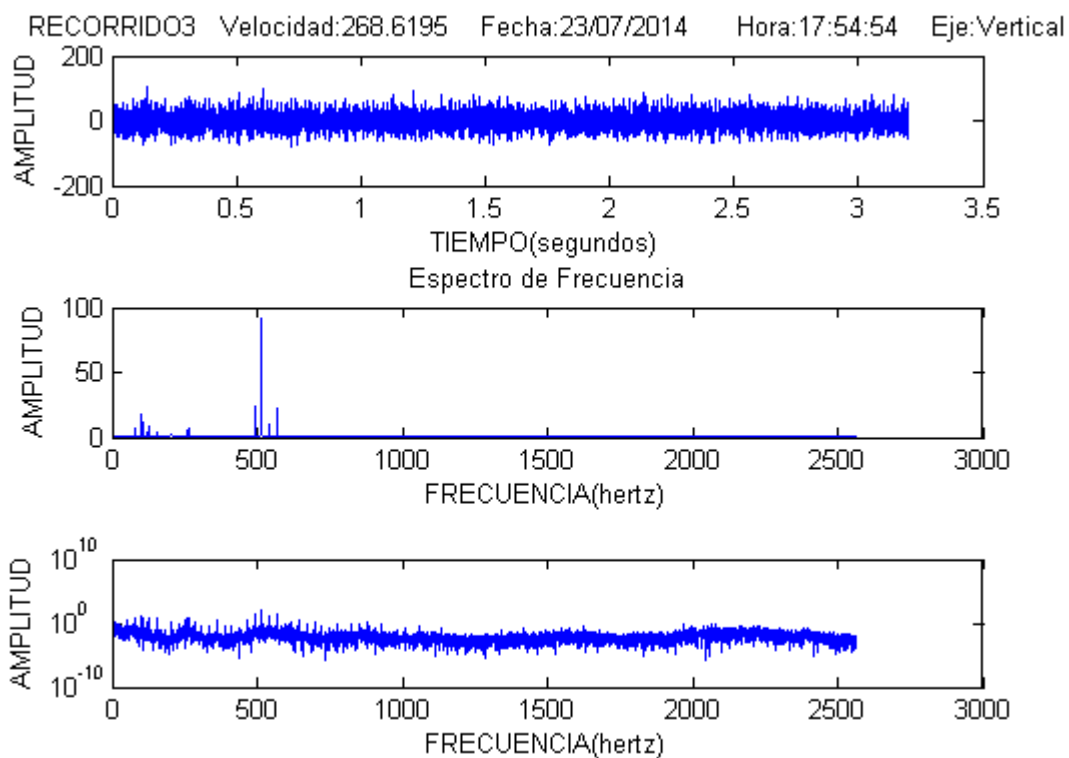


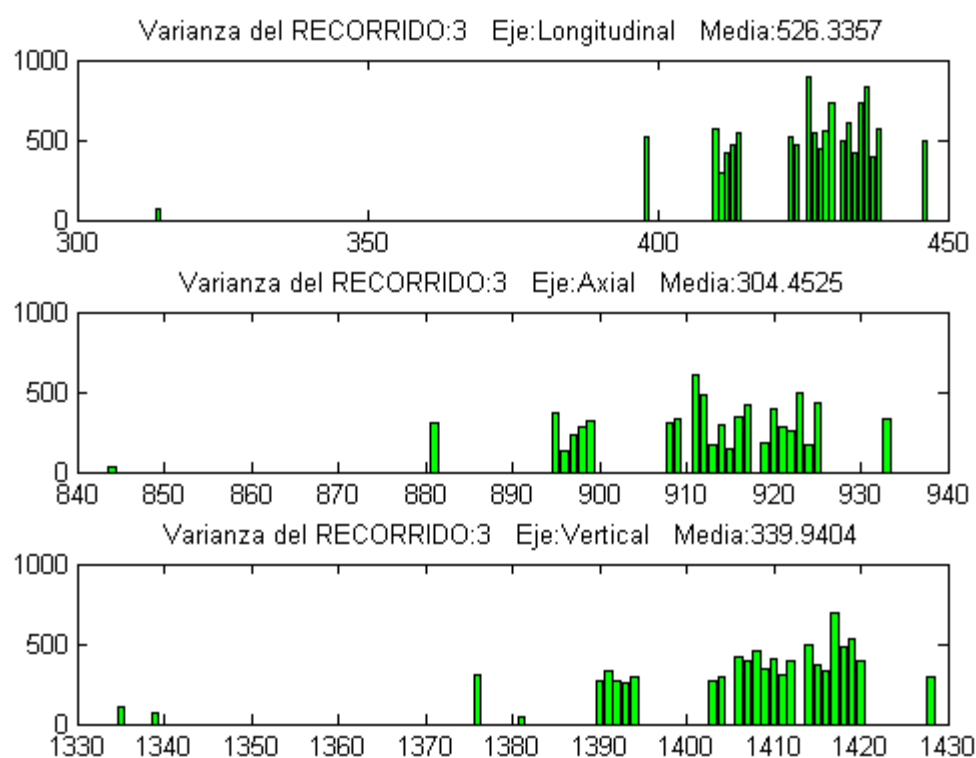
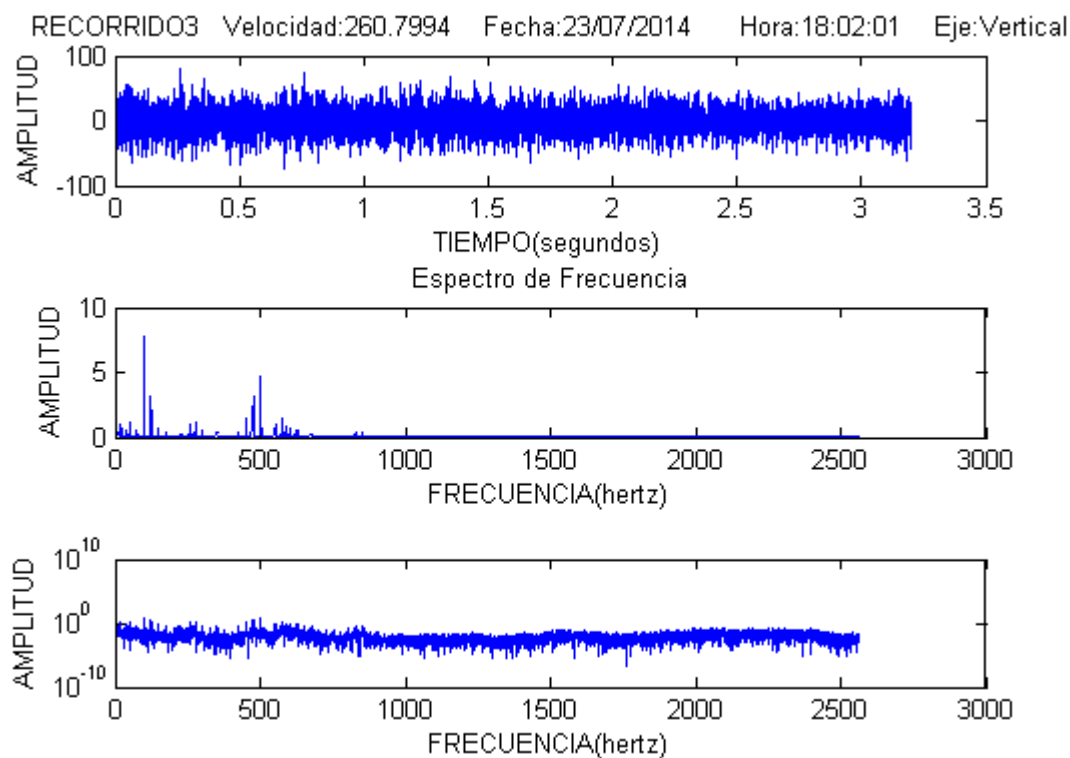


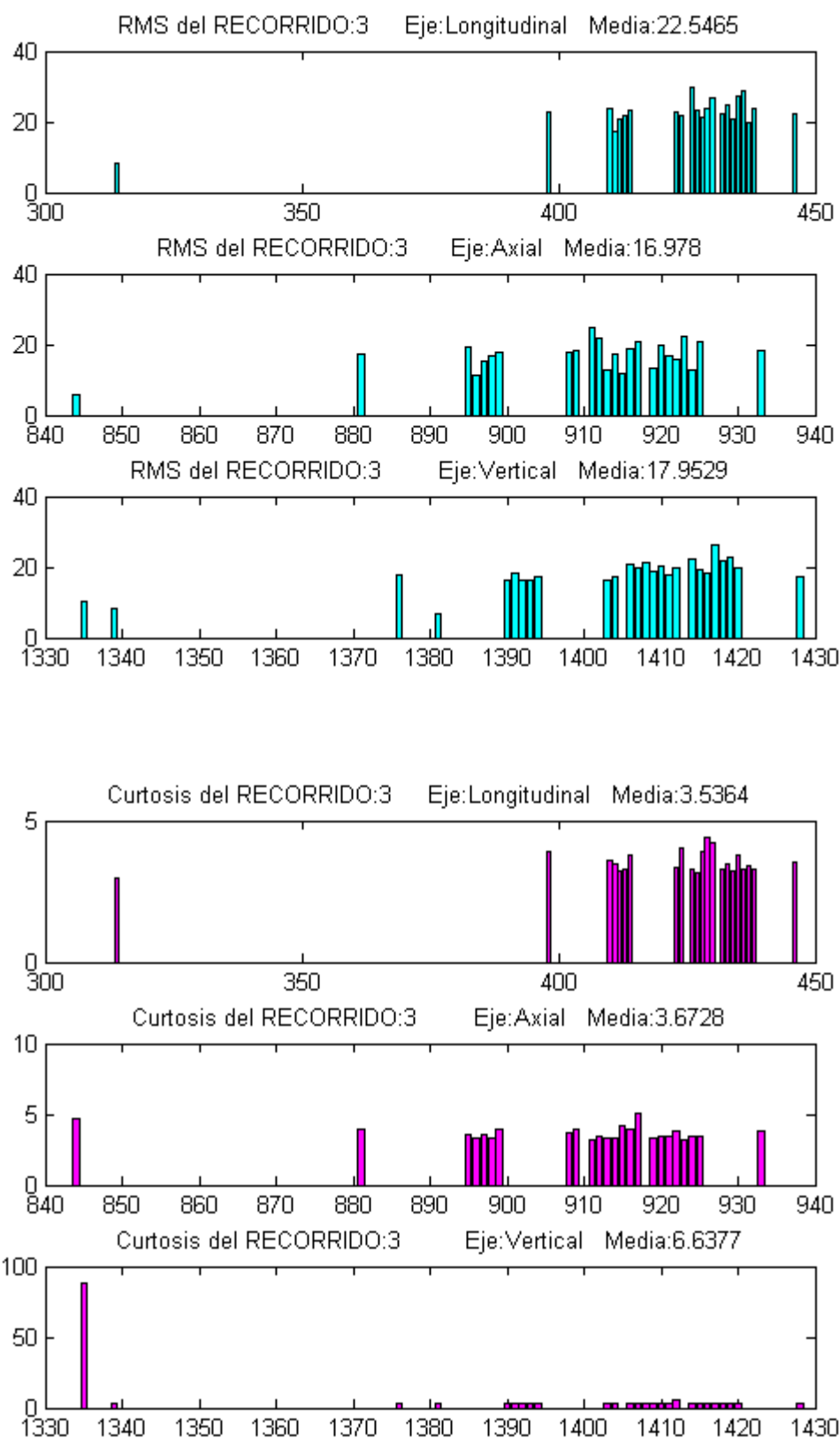


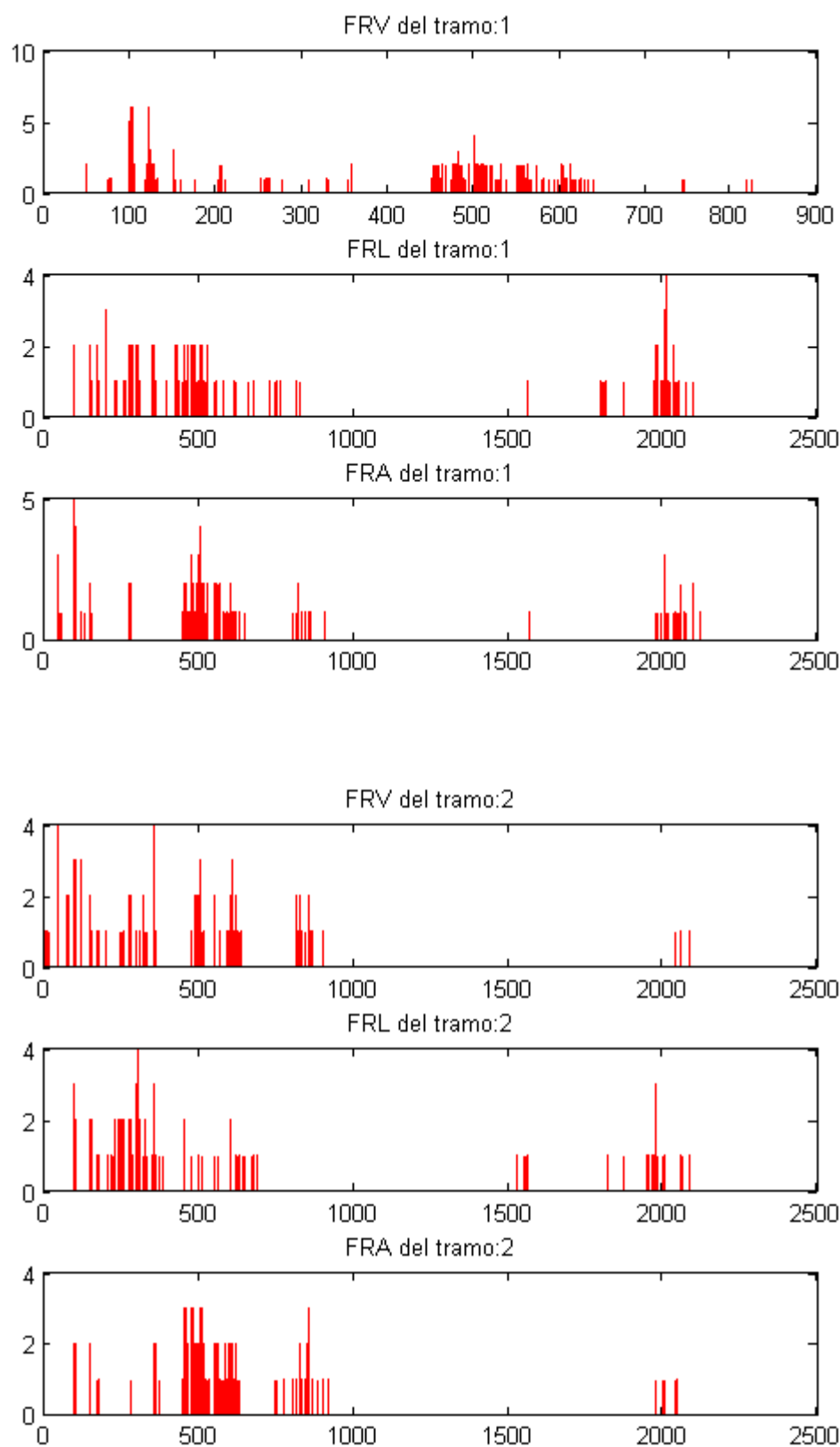


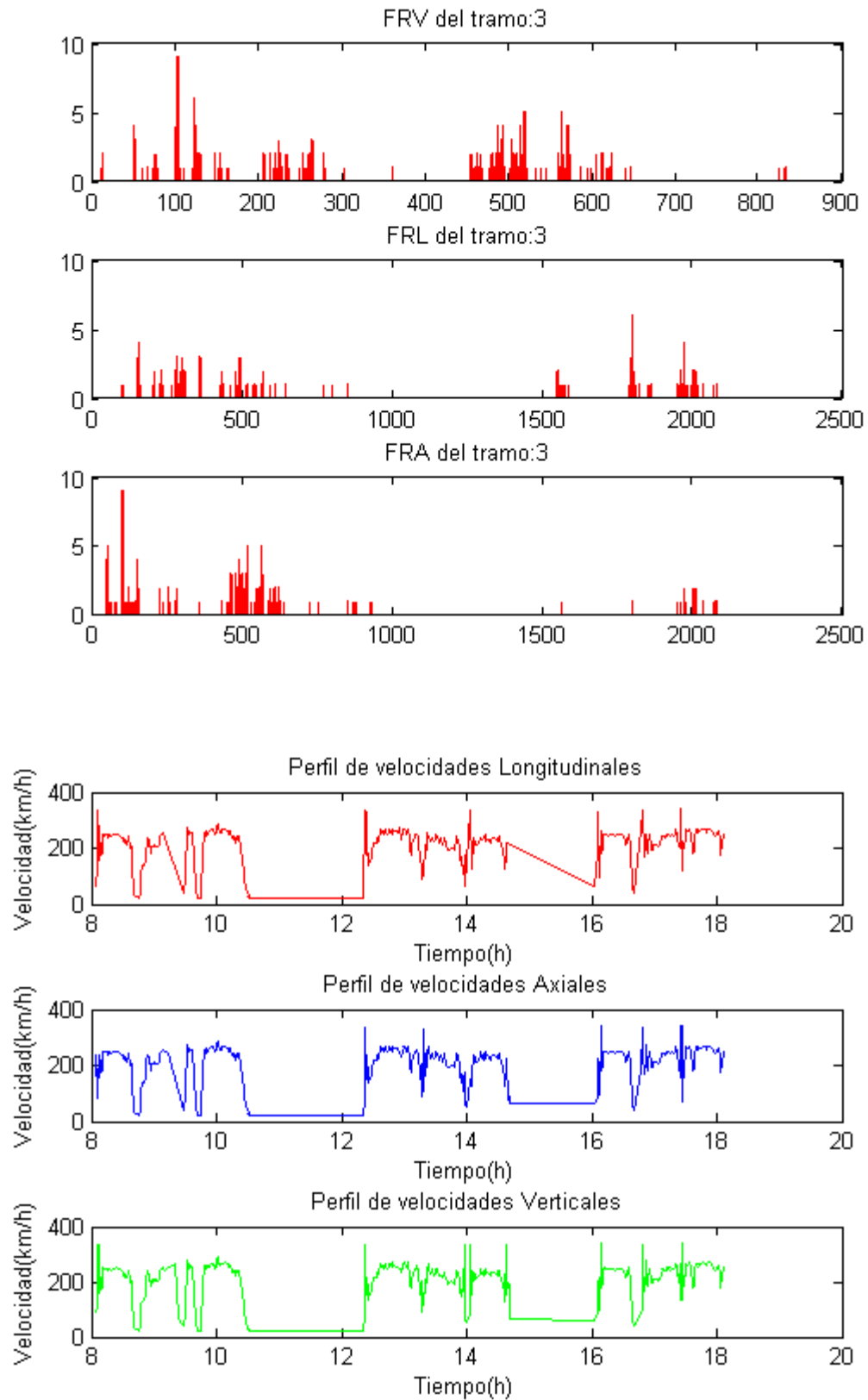












Published with MATLAB® R2013a